

COMMITTENTE



PROGETTAZIONE:



DIREZIONE TECNICA

U.O. INFRASTRUTTURE CENTRO

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA

RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI

LOTTO 1 - TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO

GEOTECNICA

Relazione di calcolo rilevati e interventi di consolidamento 2/3

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I A 4 S 0 1 D 2 9 C L G E 0 0 0 6 0 0 2 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	E. Lombardo	28/05/2019	L. Eboli	29/05/2019	T. Paoletti	30/05/2019	Arduini 05/2019
								ITALFERR S.p.A. Direzione Tecnica Infrastrutture Centro Dott. Ing. Fabrizio Arduini n. 15302/2019

File: IA4S01D29CLGE0006002A

n. Elab.: 4-8

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 2 di 188

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	5
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	6
2.1 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO E DI BASE.....	6
2.2 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO.....	6
2.3 SOFTWARE.....	7
3. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE.....	8
3.1 CRITERI GENERALI DI VERIFICA.....	8
3.2 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO STATICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	9
3.2.1 Stati limite ultimi (SLU).....	9
3.2.2 Stati limite di esercizio (SLE).....	12
3.3 STABILITÀ DEL SITO NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	12
3.4 VERIFICHE DI SICUREZZA IN CAMPO SISMICO PER OPERE IN MATERIALI SCIOLTI.....	13
3.4.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche.....	13
3.4.2 Stati limite ultimi (SLU).....	15
3.4.3 Stati limite di esercizio (SLE).....	15
4. AZIONE SISMICA DI PROGETTO E VALUTAZIONE NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	17
4.1 DETERMINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA.....	17
4.2 COMPONENTI DELL'ACCELERAZIONE EQUIVALENTE.....	19
4.3 SINTESI DELLE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE.....	20
5. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA.....	24
5.1 CODICI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	24
5.1.1 Slope/W.....	24
5.1.2 Plaxis 2D.....	24
5.2 METODOLOGIE DI VERIFICA ADOTTATE.....	25
5.2.1 Verifiche di stabilità in assenza di materiali liquefacibili.....	25

5.2.2	Verifiche di stabilità in presenza di materiali liquefacibili	25
5.2.3	Valutazione degli spostamenti	26
6.	CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO	28
6.1	DESCRIZIONE DEI RILEVATI FERROVIARI	28
6.2	MATERIALI COSTITUENTI IL RILEVATO	28
6.3	CARICHI DI PROGETTO	29
7.	CARATTERISTICHE DEGLI INTERVENTI DI TRATTAMENTO	31
7.1	COLONNE IN DEEP MIXING	31
7.1.1	Descrizione della tecnica	31
7.1.2	Dimensionamento dell'intervento.....	35
7.2	COLONNE DI GHIAIA.....	38
7.2.1	Descrizione della tecnica	38
7.2.2	Dimensionamento dell'intervento.....	41
8.	SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO SIGNIFICATIVE.....	43
9.	SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 2+700.....	44
9.1	STRATIGRAFIA E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO	44
9.2	VERIFICHE SLU – STABILITÀ GLOBALE	46
9.2.1	Verifiche SLU in condizioni statiche.....	46
9.2.2	Verifiche SLU in condizioni sismiche (co-sismica)	47
9.2.3	Verifiche SLU in condizioni di terreno liquefatto (post-sismica).....	49
9.3	VERIFICHE SLE – VALUTAZIONE DEI CEDIMENTI	55
9.3.1	Analisi preliminari del rilevato senza interventi.....	55
9.3.2	Dimensionamento del trattamento con colonne di ghiaia.....	63
9.3.3	Analisi finali rilevato con interventi.....	65
10.	FERMATA AEROPORTO (TRATTA PK 2+710÷2+960)	72
10.1	ANALISI DIMENSIONAMENTO COLONNE IN DEEP MIXING (DCM)	72
11.	CONSIDERAZIONI FINALI SUI RILEVATI DA 1+250 A 4+500.....	74

ALLEGATO A - RISULTATI VERIFICHE A LIQUEFAZIONE CON INTERVENTI76

ALLEGATO B - RISULTATI ANALISI PLAXIS RIL. 2+700 SENZA INTERVENTI78

ALLEGATO C - RISULTATI ANALISI PLAXIS RIL. 2+700 CON INTERVENTI134

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 5 di 188

1. INTRODUZIONE

Il presente documento riporta le verifiche, ai sensi della Normativa vigente (Doc. Rif.[7] e [8]), relative alle sezioni caratteristiche dei tratti in rilevato della sede ferroviaria tra la progressiva 1+250 e la progressiva 4+500 nella tratta Pescara Porta Nuova - Chieti (Lotto 1) nell'ambito del progetto di raddoppio ferroviario.

Per quanto concerne le opere stradali si rimanda ai documenti dedicati.

Il documento è così articolato:

Nel Cap. 2 si riportano i documenti di riferimento e la normativa citati nel testo.

Nel Cap. 3 si descrivono i criteri generali di progettazione in accordo alla Normativa vigente (Doc. Rif.[5] e [6]).

Nel Cap. 4 si definisce l'azione sismica di progetto e la valutazione del sito nei confronti della liquefazione.

Nel Cap. 5 si descrivono i codici di calcolo ed i criteri di verifica adottati.

Nel Cap. 6 si riporta la descrizione del corpo ferroviario in esame da un punto di vista geometrico, le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti il rilevato e i sovraccarichi presenti.

Nel Cap. 7 si riporta la descrizione tipologica degli interventi di trattamento utilizzabili per il progetto.

Nel Cap. 8 si definiscono le sezioni caratteristiche nell'ambito della tratta in esame.

Nel Cap. 9 si riportano, le sezioni caratteristiche selezionate per la tratta in esame, i dati geotecnici di calcolo, le descrizioni delle verifiche condotte e i risultati ottenuti.

Nel Cap. 10 si riporta la descrizione tipologica e il dimensionamento degli interventi di trattamento specifici della tratta tra la pk 2+710 e la pk 2+960, corrispondente alla Fermata Aeroporto.

Nel Cap. 0 sono invece riportate le considerazioni finali sulle valutazioni presentate e gli interventi proposti.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 6 di 188

2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Documentazione di progetto e di base

Si riporta di seguito l'elenco dei documenti utilizzati per la stesura della presente relazione:

- [1] PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA – Relazione geotecnica generale (Doc. rif. - IA4S01D29GEGE0006001B)
- [2] PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA – Plano-profilo geotecnico - Tav. 1 - (Doc. rif. - IA4S01D29F6GE0006001A)
- [3] PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA - Plano-profilo geotecnico - Tav. 2 - (Doc. rif. - IA4S01D29F6GE0006002A)
- [4] PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA - Plano-profilo geotecnico - Tav. 3 - (Doc. rif.- IA4S01D29F6GE0006003A)
- [5] PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA - Plano-profilo geotecnico - Tav. 4 - (Doc. rif. - IA4S01D29F6GE0006004A)
- [6] PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA - Plano-profilo geotecnico - Tav. 5 - (Doc. rif. - IA4S01D29F6GE0006005A)

2.2 Normativa e standard di riferimento

Si riporta di seguito l'elenco delle normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione:

- [7] Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018: “Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”, G.U. n.29 del 20.2.2018, Supplemento Ordinario n.30.
- [8] Circolare del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7 del Consiglio superiore dei Lavori Pubblici recante “Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018”
- [9] RFI DTC SI MA IFS 001 C del 21.12.2018- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI”.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 7 di 188

- [10] RFI DTC INC CS LG IFS 001 A del 21.12.2011 – “Linee guida per il collaudo statico delle opere in terra”.
- [11] RFI DTC SI SP IFS 001 C del 21.12.2018- Capitolato generale tecnico di appalto delle opere civili – Parte II – Sezione 5 – “Opere in terra e scavi”– RFI.
- [12] 2008/217/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo ad alta velocità (20/12/2007)”.
- [13] 2011/275/CE - “Specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema «infrastruttura» del sistema ferroviario transeuropeo convenzionale (26/04/2011)”.
- [14] UNI EN 1997-1 : Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- [15] UNI EN 1998-5 : Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici.

2.3 Software

- [1] SLOPEW – GeoSlope (www.geo-slope.com)
- [2] PLAXIS B.V.. “Plaxis – Finite Element Code for Soil and Rock Analyses”. Plaxis 2D – AE.02. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherland. ([http:// w.plaxis.nl](http://w.plaxis.nl))

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 8 di 188

3. CRITERI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE

3.1 Criteri generali di verifica

Per le opere in esame devono essere svolte le seguenti verifiche di sicurezza e delle prestazioni attese (par. 6.2.3. del Doc. Rif. [7]):

- Verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU);
- Verifiche agli Stati Limite d'Esercizio (SLE).

Per ogni **Stato Limite Ultimo (SLU)** deve essere rispettata la condizione

$$E_d \leq R_d \quad (\text{Eq. 6.2.1 del Doc. Rif. [7]})$$

dove:

E_d = valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

R_d = valore di progetto della resistenza.

La verifica della condizione $E_d \leq R_d$ deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni ($A1$ e $A2$), per i parametri geotecnici ($M1$ e $M2$) e per le resistenze ($R1$, $R2$ e $R3$). I coefficienti da adottarsi nelle diverse combinazioni sono definiti in funzione del tipo di verifica da effettuare (si vedano i paragrafi seguenti). Si sottolinea che per quanto concerne le azioni di progetto E_d tali forze possono essere determinate applicando i coefficienti parziali di cui sopra alle azioni caratteristiche, oppure, a posteriori, sulle sollecitazioni prodotte dalle azioni caratteristiche (Par. 6.2.3.1 del Doc. Rif. [7]).

Per ogni **Stato Limite d'Esercizio (SLE)** deve essere rispettata la condizione

$$E_d \leq C_d \quad (\text{Eq. 6.2.7 del Doc. Rif. [7]})$$

dove:

E_d = valore di progetto dell'effetto dell'azione;

C_d = valore limite prescritto dell'effetto delle azioni (definito Progettista Strutturale).

La verifica della condizione $E_d \leq C_d$ deve essere effettuata impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 9 di 188

3.2 Verifiche di sicurezza in campo statico per opere in materiali sciolti

In base a quanto indicato dalle NTC 2018 le verifiche di sicurezza che devono essere condotte per opere costituite da materiali sciolti sono le seguenti.

3.2.1 Stati limite ultimi (SLU)

Le verifiche di stabilità in campo statico di opere in materiali sciolti, quali rilevati, devono essere eseguite secondo il seguente approccio (Par. 6.8.2 del Doc. Rif.[7]):

Approccio 1:

- Combinazione 2 : $A2 + M2 + R2$

tenendo conto dei coefficienti parziali sotto definiti.

La verifica di stabilità globale si ritiene soddisfatta se:

$$\frac{R_d}{E_d} \geq 1 \Rightarrow \frac{\frac{1}{\gamma_R} \cdot R}{E_d} \geq 1 \Rightarrow \frac{R}{E_d} \geq \gamma_R$$

essendo R resistenza globale del sistema (Par. C.6.8.6.2 del Doc. Rif.[8]), calcolata sulla base delle azioni di progetto, dei parametri di progetto e della geometria di progetto

$$(R = R \left[\gamma_F \cdot F_k \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} ; a_d \right]).$$

La stabilità globale dell'insieme manufatto-terreno di fondazione deve essere studiata nelle condizioni corrispondenti alle diverse fasi costruttive ed al termine della costruzione.

Facendo riferimento a quanto previsto al p.to 3.5.2.3.8 del Doc Rif. [9], per le verifiche agli stati limite ultimi si adottano i valori dei coefficienti parziali in Tabella 1 (Tab. 5.2.V del Doc Rif. [7]) e i coefficienti di combinazione ψ in Tab. 5.2.VI.

		Coefficiente	EQU ¹	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,10	1,35	1,00
Carichi permanenti non strutturali	favorevoli	γ_{G2}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Ballast	favorevoli	γ_B	0,90	1,00	1,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Carichi variabili da traffico	favorevoli	γ_Q	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,45	1,45	1,25
Carichi variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevoli		1,50	1,50	1,30
Precompressione	favorevole	γ_P	0,90	1,00	1,00
	sfavorevole		1,00	1,00	1,00
Ritiro, viscosità e cedimenti non imposti appositamente	favorevole	γ_{ced}	0,00	0,00	0,00
	sfavorevole		1,20	1,20	1,00

Tabella 1: Coefficienti parziali sulle azioni (Tab. 5.2.V del Doc. Rif.[7])

In Tabella 1 (Tab. 5.2.V del Doc. Rif. [7]) il significato dei simboli è il seguente:

- γ_{G1} coefficiente parziale del peso proprio della struttura, del terreno e dell'acqua, quando pertinente;
- γ_{G2} coefficiente parziale dei pesi propri degli elementi non strutturali;
- γ_B coefficiente parziale del peso proprio del ballast;
- γ_Q coefficiente parziale delle azioni variabili da traffico;
- γ_{Qi} coefficiente parziale delle azioni variabili.

¹ Equilibrio che non coinvolga i parametri di deformabilità e resistenza del terreno; altrimenti si applicano i valori di GEO.

Tabella 2: Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.2.VI del Doc. Rif.[7])

Azioni	Descrizione	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Azioni singole da traffico	Carico sul rilevato a tergo delle spalle	0,80	0,50	0,0
	Azioni aerodinamiche generate dal transito dei convogli	0,80	0,50	0,0
Gruppi di carico	gr ₁	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽³⁾	0,0
	gr ₂	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽³⁾	-
	gr ₃	0,80 ⁽²⁾	0,80 ⁽³⁾	0,0
	gr ₄	1,00	1,00 ⁽³⁾	0,0
Azioni del vento	F _{wk}	0,60	0,50	0,0
Azioni da neve	in fase di esecuzione	0,80	0,0	0,0
	SLU e SLE	0,00	0,0	0,0
Azioni termiche	T _k	0,60	0,60	0,50

 Tabella 3: Coefficienti di combinazione ψ delle azioni (Tab. 5.2.VII Doc. Rif.[7])

	Azioni	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Azioni singole da traffico	Treno di carico LM 71	0,80 ⁴	5	0,0
	Treno di carico SW /0	0,80 ⁽⁴⁾	0,80	0,0
	Treno di carico SW/2	0,00 ⁽⁴⁾	0,80	0,0
	Treno scarico	1,00 ⁽⁴⁾	-	-
	Centrifuga	⁽⁶⁾ (4)	6	⁽⁶⁾
	Azione laterale (serpeggio)	1,00 ⁽⁴⁾	0,80	0,0

Tabella 4: Coefficienti parziali sui terreni (M1 ed M2) - (Tab. 6.2.II, del Doc. Rif.[7])

PARAMETRO	Coefficiente parziale	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\gamma_{\phi'}$	1.0	1.25
Coesione efficace	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
Resistenza non drenata	γ_{Cu}	1.0	1.4
Peso dell'unità di volume	γ_{γ}	1.0	1.0

² Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti ψ_0 relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0,00.

³ 0,80 se è carico solo un binario, 0,60 se sono carichi due binari, e 0,40 se sono carichi tre o più binari.

⁴ Quando come azione di base venga assunta quella del vento, i coefficienti ψ_0 relativi ai gruppi di carico delle azioni da traffico vanno assunti pari a 0,00.

⁵ 0,80 se è carico solo un binario, 0,60 se sono carichi due binari e 0,40 se sono carichi tre o più binari.

⁶ Si usano gli stessi coefficienti ψ adottati per i carichi che provocano dette azioni

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 12 di 188

Tabella 5: Coefficienti parziali per le verifiche di stabilità globale (R2) - (Tab. 6.8.I, Doc. Rif. [7])

Coefficiente parziale	(R2)
γ_R	1.1

3.2.2 Stati limite di esercizio (SLE)

Deve essere verificato, mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali (Par. 6.5.3.2 del Doc. Rif. [7]), che gli spostamenti dell'opera in esame e del terreno circostante siano compatibili con la funzionalità della struttura e con la sicurezza e la funzionalità di manufatti adiacenti.

Nello specifico, come riportato nei Doc. Rif. [9][11], RFI stabilisce un valore soglia degli spostamenti residui attesi, corrispondenti ad uno Stato Limite di Esercizio (S_{SLE}), pari a 5 cm. Tale valore deve essere opportunamente confrontato con i valori calcolati al di sotto del rilevato.

Deve essere tenuto presente che le verifiche agli Stati Limite di Esercizio possono risultare più restrittive di quelle agli Stati Limite Ultimi.

3.3 Stabilità del sito nei confronti della liquefazione

In base a quanto indicato nelle NTC 2018 il sito presso il quale è ubicata l'opera deve essere stabile nei confronti della liquefazione. Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.

Le NTC2018 al paragrafo 7.11.3.4.2 stabiliscono che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

- Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di campo libero (cfr. a_{max}) minori di 0.1 g;
- Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 13 di 188

- Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche SPT normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche CPT, normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
- Distribuzione granulometrica esterna alle zone comprese tra le curve tipiche per materiali con coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$ e coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$.

In caso contrario risulta necessario valutare il rischio di liquefazione e i potenziali effetti in superficie mediante procedimento descritto nel Doc. Rif. [1] basato sui risultati di prove CPT e SPT.

3.4 Verifiche di sicurezza in campo sismico per opere in materiali sciolti

3.4.1 Stati limite di riferimento per le verifiche sismiche

Le NTC 2018 (Doc. Rif. [7]) stabiliscono differenti Stati Limite (sia d'Esercizio che Ultimi) in funzione, in primo luogo, dell'importanza dell'opera mediante l'identificazione della Classe d'Uso e poi in funzione del danno conseguente ad un certo Stato Limite. In particolare si definiscono i seguenti Stati Limite di Esercizio e Ultimi, come riportato al par. 3.2.1 del Doc. Rif. [7]:

- **Stati Limite di Esercizio (SLE):**
 - Stato Limite di immediata Operatività **SLO** per le strutture ed apparecchiature che debbono restare operative a seguito dell'evento sismico. Tale stato limite non si applica per l'opera in oggetto.
 - Stato Limite di Danno **SLD** definito come lo stato limite da rispettare per garantire la sostanziale integrità dell'opera ed il suo immediato utilizzo.
- **Stati Limite Ultimi (SLU):**
 1. Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, **SLV**, definito come lo stato limite in cui la struttura subisce una significativa perdita della rigidità nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 14 di 188

2. Stato Limite di Prevenzione del Collasso, **SLC**, stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali, mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali.

La Tabella 6 riporta, in funzione della classe d'uso della struttura, lo stato limite da considerare in funzione della verifica di sicurezza appropriata per l'opera (Tabella C7.3.I del Doc. Rif.[8]).

Tabella 6: Verifiche di sicurezza in funzione della Classe d'uso (Tab. C7.3.I, Doc. Rif.[8])

Stato Limite	Prestazione da verificare	Classe d'uso		
		I	II	III IV
SLO	Limitazione del danno degli elementi non strutturali o delle pareti delle costruzioni in muratura			X
	Funzionamento degli impianti			X
SLD	Controllo del danno degli elementi strutturali			X
	Controllo del danno degli elementi non strutturali o delle pareti delle costruzioni in muratura	X	X	
SLV	Livello di danno degli elementi strutturali coerente con il fattore di comportamento adottato, assenza di rotture fragili e meccanismi locali/globali instabili	X	X	X
	Assenza di crolli degli elementi non strutturali pericolosi per l'incolumità, pur in presenza di danni diffusi		X	X
	Capacità ultima degli impianti e dei collegamenti		X	X
SLC	Margine di sicurezza sufficiente per azioni verticali ed esiguo per azioni orizzontali		X	X
	Capacità di spostamento dei dispositivi nelle costruzioni con isolamento sismico		X	X

Con riferimento all'opera in oggetto, e considerando quanto riportato al punto C7.1 del Doc. Rif.[8], le verifiche geotecniche in presenza di un evento sismico richiedono la verifica ai seguenti stati limite:

- Stato Limite Ultimo: **SLV** – Stato Limite di Salvaguardia della Vita (cui corrisponde una probabilità di superamento $P_{vr} = 10\%$ nel periodo V_r);

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 15 di 188

- Stato Limite Esercizio: **SLD** – Stato Limite di Danno (cui corrisponde una probabilità di superamento $P_{vr} = 63\%$ nel periodo V_r).

Le suddette probabilità, valutate nel periodo di riferimento V_r per l'azione sismica, consentono di determinare, per ciascuno stato limite, il tempo di ritorno del terremoto di progetto corrispondente.

3.4.2 Stati limite ultimi (SLU)

Per tutte le verifiche l'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare (vedasi Doc. Rif. [7]). Per l'opera in oggetto, le verifiche agli Stati Limite Ultimi verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (**SLV**).

Le verifiche di sicurezza agli SLU in campo sismico devono contemplare almeno le medesime verifiche definite in campo statico. In particolare la stabilità globale in condizioni sismiche dei opere in materiali sciolti, quali rilevati, deve essere svolta ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1.2$. (vedasi Par.7.11.4 del Doc. Rif. [7]). Le condizioni di stabilità del rilevato devono essere verificate affinché prima, durante e dopo il sisma la resistenza del sistema sia superiore alle azioni, ovvero gli spostamenti permanenti indotti dal sisma siano di entità tale da non pregiudicare le condizioni di sicurezza o di funzionalità delle strutture o infrastrutture medesime.

Come riportato al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [7] le verifiche possono essere condotte mediante metodi pseudo statici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica.

3.4.3 Stati limite di esercizio (SLE)

Deve essere verificato, mediante analisi effettuate impiegando i valori caratteristici delle azioni e dei parametri geotecnici dei materiali, che gli spostamenti permanenti indotti dal sisma non alterino significativamente la resistenza della fondazione e devono essere compatibili con la funzionalità dell'opera.

L'azione sismica di progetto deve essere valutata sulla base degli Stati Limite relativi all'opera da verificare come definito nelle istruzioni per l'applicazione delle NTC2018. Per l'opera in oggetto,



VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA.
RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA
- CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM
SAN GIOVANNI TEATINO
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3

COMMESSA
IA4S

LOTTO
01 D29

CODIFICA
CL

DOCUMENTO
GE0006 002

REV.
A

FOGLIO
16 di 188

le verifiche agli Stati Limite di Esercizio verranno condotte con riferimento allo Stato Limite di Danno (SLD).

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 17 di 188

4. AZIONE SISMICA DI PROGETTO E VALUTAZIONE NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

4.1 Determinazione dell'azione sismica

La definizione dell'azione sismica di progetto per le opere afferenti il tracciato è stata condotta secondo quanto disposto dalle Norme Tecniche in vigore assunte alla base della progettazione in oggetto (Doc. Rif. [7]).

La descrizione di dettaglio della determinazione dell'azione sismica di riferimento per le verifiche geotecniche è riportata nella Relazione Geotecnica (Doc. Rif. [1]). Nel seguito si riprende tale descrizione nei contenuti e determinazioni principali.

In particolare, l'azione sismica in base alla quale è stato il rispetto dei diversi stati limite per le strutture in progetto, è stata definita a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione, a sua volta espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

La definizione dell'azione sismica comprende la determinazione delle ordinate dello spettro di risposta elastica in accelerazione $S_e(T)$ “ancorato” al valore di a_g , facendo riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} , nel periodo di riferimento V_R per la vita utile della struttura.

In particolare, nel caso in esame delle opere lungo la linea ferroviaria di PD, trattandosi di una opera infrastrutturale di elevata importanza, ma non inquadrata all'interno del sistema di grande viabilità ferroviaria, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è stato assunto in sede progettuale (Doc. Rif. [1]):

$$V_N = 75 \text{ anni}$$

e appartenente alla Classe d'Uso II, alla quale le NTC2018 fanno corrispondere un coefficiente d'uso:

$$C_U = 1.0.$$

Pertanto la vita di riferimento dell'opera V_R risulta pari a 75 anni.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 18 di 188

Data la probabilità di superamento nel periodo di riferimento considerato, funzione dello Stato Limite di verifica, la forma spettrale è definita a partire dai valori dei seguenti parametri relativi ad un sito di riferimento rigido e orizzontale:

- a_g accelerazione orizzontale massima su sito rigido e superficie topografica orizzontale;
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_{c^*} periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Si è quindi proceduto alla definizione del tempo di ritorno T_R di riferimento per l'azione sismica, nel caso in esame corrispondente a 1068 anni (per lo stato limite SLV con P_{vr} del 10%) sulla base della classificazione delle opere in progetto, e successivamente sono stati definiti gli stati limite di interesse per la verifica strutturale, i periodi di ritorno corrispondenti dell'azione sismica per suolo rigido in corrispondenza dei punti di interesse collocati lungo il tracciato.

La determinazione della categoria di suolo (e topografica) è stata eseguita attraverso l'interpretazione delle indagini geotecniche e geofisiche, sulla base delle informazioni disponibili, ai fini della microzonazione.

In particolare, come specificato nel Doc. Rif. [1], ai fini normativi e di progetto l'intero tracciato ricade nella categoria stratigrafica C.

L'amplificazione dell'azione sismica viene determinata, secondo le NTC2018, attraverso l'impiego di un fattore di sito S funzione sia della categoria di sottosuolo (S_s) sopra determinata, sia dell'andamento della superficie topografica (S_T):

$$S = S_s \cdot S_T.$$

Per la **categoria di sottosuolo C**, Il coefficiente S_s si ottiene dalla seguente espressione (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_s = 1.0 \leq 1.70 - 0.6 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1.50$$

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, secondo quanto riportato nel Doc. Rif.[1], il tracciato corre all'interno di un sito sostanzialmente pianeggiante e viene classificato in categoria

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 19 di 188

topografica T1 (Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, v. Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018). Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta pari a:

$$S_T = 1$$

Il fattore di sito S e l'azione sismica di progetto $a_{max} = S \cdot a_g$ ottenuti per i diversi periodi di ritorno in corrispondenza dello stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV).

Tabella 7-Parametri per la valutazione dell'azione sismica

SL	T_R (anni)	Lotto 1		
		a_g (g)	S (-)	a_{max} (g)
SLV	712	0.180	1.431	0.258

A partire dai valori sopra riportati risulta:

$$a_{max} [g] = S a_g [g] = 0.180 \times 1.431 \times 1.0 = 0.258.$$

4.2 Componenti dell'accelerazione equivalente

Come definito in normativa, a meno di specifiche analisi dinamiche, è possibile svolgere le verifiche di sicurezza mediante analisi pseudo-statiche o analisi agli spostamenti.

4.2.1.1 Coefficienti sismici per la verifica di stabilità globale

Come descritto al Par. C7.11.4 del Doc. Rif. [8], la verifica di stabilità globale va condotta mediante il metodo di analisi definito al Par. 7.11.3.5 del Doc. Rif.[7], inerente alla stabilità dei pendii.

Sulla base di quanto definito al Par.7.11.3.5.2 del Doc. Rif.[7], in mancanza di studi specifici, i coefficienti sismici k_h (orizzontale) e k_v (verticale) sono definiti come:

$$k_h = \beta_s a_{max}/g$$

$$k_v = \pm k_h / 2$$

essendo

β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 20 di 188

Come chiarito al Par. 7.11.4 del Doc. Rif. [7] il valore del coefficiente β_s da assumere è pari a 0.38 per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, come nel caso in oggetto.

In accordo alle espressioni di cui sopra, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV (Tabella 8):

Tabella 8: Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale

STATO LIMITE	T_R	k_h	k_v
	[anni]	[g]	[g]
SLV	1068	0.098	± 0.049

4.3 Sintesi delle verifiche a liquefazione

Al fine di definire se nella tratta oggetto della presente relazione vi siano zone potenzialmente instabili nei confronti della liquefazione, sono state condotte una serie di verifiche per la cui descrizione di dettaglio si rimanda alla Relazione Geotecnica (Doc. Rif.[1]).

Le verifiche sono state condotte in accordo al “metodo semplificato” originariamente proposto da Seed e Idriss (1971,1982) e da Seed et al. (1985), confrontando lo sforzo di taglio ciclico normalizzato rispetto alla pressione verticale in sito (CSR) e la resistenza normalizzata del terreno al taglio ciclico (CRR). Il rapporto di resistenza ciclica CRR è stato valutato mediante relazioni empiriche che correlano la sollecitazione sismica ai risultati delle prove penetrometriche statiche (CPT) e dinamiche (SPT) eseguite in sito lungo il tracciato.

Il fattore di sicurezza FL rispetto al fenomeno della liquefazione, in accordo a Youd et al. (2001), vale:

$$FL = (CRR_{7.5}/CSR) MSF k_{\sigma}$$

L'indice di Potenziale di Liquefazione (in letteratura LPI, Liquefaction Potential Index) in accordo a Iwasaki et al. (1982) viene determinato come segue:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) dz$$

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 21 di 188

dove $W(z)$ rappresenta un moltiplicatore (peso) linearmente decrescente con la profondità z (da 0 a 20 m) in grado di assegnare una maggiore importanza a ciò che avviene all'interno degli strati più superficiali

Oltre a queste verifiche, sono stati valutati anche i cedimenti da riconsolidazione post-terremoto, a seguito di generazione di sovrappressioni interstiziali durante la fase di scuotimento, sulla base di relazioni derivate da prove di laboratorio, in generale buona relazione con effetti osservati su scala reale (Idriss & Boulanger, 2008). In particolare, i cedimenti attesi sono stati determinati in accordo alla procedura proposta da Ishihara and Yoshimine (1992), la quale mette in relazione le deformazioni volumetriche post-sisma con i valori massimi di sforzo a taglio sviluppati durante i cicli di carico non drenato e la densità relativa iniziale del suolo.

In sintesi, gli spessori di materiale potenzialmente liquefacibile per la tratta in esame sono riportati nella seguente Tabella 9. Si osserva come gli strati caratterizzati da potenziale liquefazione sotto il terremoto di progetto in questa tratta sono generalmente a media o elevata profondità da p.c. e di spessore relativamente contenuto. In Figura 1 e 2 sono rappresentate le sezioni tipologiche delle tratte a rischio liquefazione (sez. 1+500 e sez. 2+700) e il terreno di fondazione sottostante con lo strato di materiale liquefacibile.

Tabella 9: Sintesi dei risultati delle verifiche a liquefazione ed individuazione dei tratti potenzialmente liquefacibili

Tratto di linea	Indagini di riferimento	Quota media piano campagna	Spessore materiale potenzialmente liquefacibile	Elevazione		FL	LPI (*) Classe di pericolosità	Stima cedimento post-sisma atteso (*)
		[m slm]	[m]	da [m slm]	a [m slm]			
1+250 – 1+480	S4, SCPU03, S5	+2.5	-	-	-	-	- (Nessuna)	-
1+480 – 1+900	SCPTU04	+4.0	4	-9.8	-13.8	< 1	0.8 (Bassa)	10.8
1+900 – 2+650	-	+8.0	-	-	-	-	- (Nessuna)	-
2+650 – 3+100	CPTU02, S8n	+9.0	3	+5	+2	< 1	7.9 (Alta)	11
3+100 – 4+500	S6, CPTU03	+13.0	-	-	-	-	- (Nessuna)	-

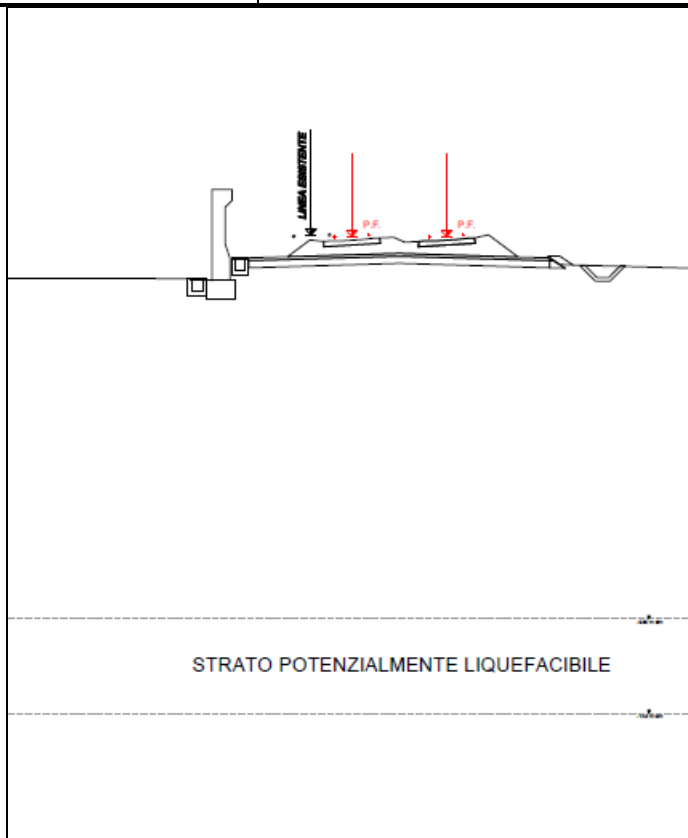


Figura 1- Sezione rilevato alla pk 1+500 su strato di terreno liquefacibile

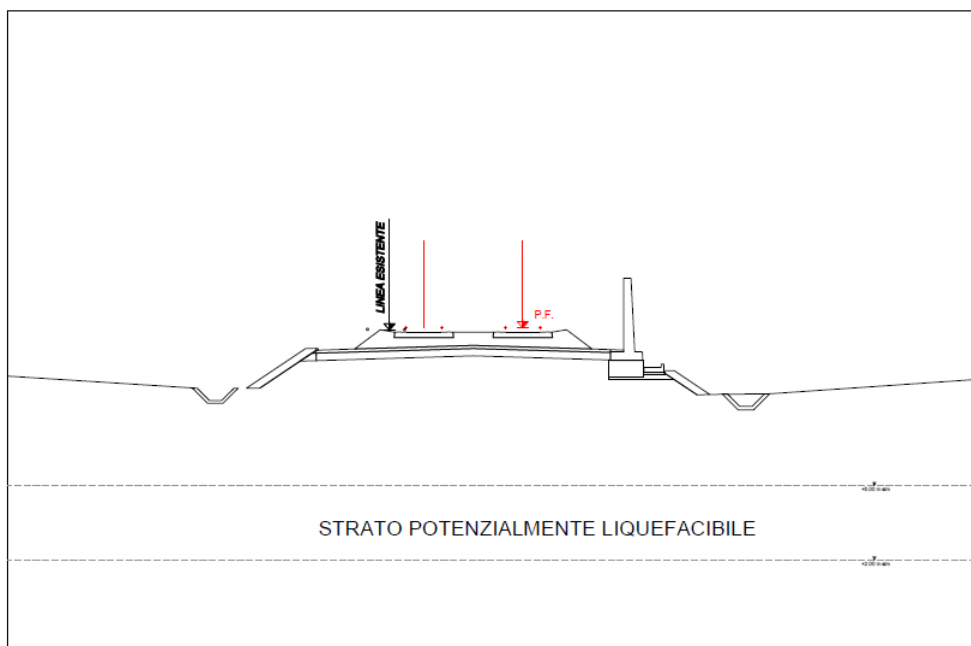


Figura 2- Sezione rilevato alla pk 2+700 su strato di terreno liquefacibile

Di tali valutazioni si è tenuto conto nel seguito per la selezione delle verifiche da eseguirsi e per la definizione di eventuali interventi di trattamento.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 24 di 188

5. CODICI DI CALCOLO E METODOLOGIE DI VERIFICA

5.1 Codici di calcolo utilizzati

5.1.1 Slope/W

Slope/W è un codice di calcolo dedicato allo studio della stabilità dei pendii che permette di calcolare il fattore di sicurezza dei pendii in terreno e in roccia.

Il codice Slope/W utilizza il metodo dell'equilibrio limite e permette di prendere in considerazione superfici di scorrimento definite in diversi modi, condizioni stratigrafiche e idrostratigrafiche complesse mediante l'utilizzo di diversi modelli costitutivi per i materiali e condizioni di pressioni neutre variabili. Sono inoltre utilizzabili diversi metodi di analisi e possono essere applicate condizioni di carico di vario tipo.

La versione del software adottata per le verifiche condotte nel presente documento è SLOPE/W – GeoSLOPE ver. 7.17 - GEOSTUDIO 2007.

5.1.2 Plaxis 2D

Plaxis 2D è un codice di calcolo agli elementi finiti (sviluppato dalla Delft University of Technology) bidimensionale in grado di tenere conto del comportamento del terreno seguendo la variazione dello stato tensionale e deformativo nei vari punti dell'ammasso considerato e negli eventuali elementi strutturali collegati con i quali interagisce.

E' utilizzabile per eseguire analisi di stabilità e di deformazione nell'ambito di molteplici applicazioni geotecniche. Il programma permette di simulare situazioni reali riconducibili a condizioni di deformazione piane (plane strain) o a condizioni assialsimmetriche (axisymmetric).

Plaxis consente di svolgere diversi tipi di calcolo agli elementi finiti distinguendo tra calcoli di tipo Plastico (plastic), Analisi di consolidazione (consolidation), Analisi di stabilità con il metodo della riduzione dei parametri di resistenza (phi-c reduction) e Analisi dinamiche (dynamic).

La versione del software adottata per le analisi condotte nel presente documento è Plaxis 2D AE.02.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 25 di 188

5.2 Metodologie di verifica adottate

5.2.1 Verifiche di stabilità in assenza di materiali liquefacibili

L'esame delle condizioni di stabilità dei rilevati è stato condotto utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite.

Il coefficiente di sicurezza a rottura lungo la superficie di scorrimento viene definito come rapporto tra la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie e quella effettivamente mobilitata:

$$F_s = \frac{T_{disp}}{T_{mob}}$$

Il codice Slope/W è stato utilizzato nel presente documento per condurre le analisi di stabilità sia in campo statico che in campo sismico (adottando il metodo pseudo-statico) costituenti le verifiche SLU richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti.

Per le analisi in condizioni sismiche è stata adottata cautelativamente, come già anticipato al punto 4, l'azione riferita alle sezioni oggetto del presente documento tra quelle individuate lungo il tracciato nella Relazione Geotecnica (Doc. rif. [1]).

Nelle analisi sono state escluse, perché considerate non significative, le superfici di rottura superficiali che coinvolgono volumi di terreno ridotti. A tal proposito si sottolinea che, nei calcoli, a favore di sicurezza, non è stato preso in conto in alcun modo l'effetto che la finitura a verde delle scarpate darà necessariamente, in termini di coesione efficace, allo strato più superficiale delle scarpate, né il pacchetto di pavimentazione stradale ferroviaria che contribuisce anch'esso ad incrementare la resistenza allo scivolamento nella porzione di meccanismo che attraversa tali materiali.

5.2.2 Verifiche di stabilità in presenza di materiali liquefacibili

Anche le verifiche di stabilità per i tratti dove è stata individuata la presenza di materiale liquefacibile sono state condotte utilizzando gli usuali metodi dell'equilibrio limite mediante il codice Slope/W.

In particolare tali analisi sono finalizzate non solo alla valutazione della stabilità del rilevato in condizioni statiche di cui al punto precedente, ma anche a valutare l'eventuale impatto della

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 26 di 188

liquefazione in senso lato, compresa quindi la generazione di sovrappressioni interstiziali, sulla stabilità dei rilevati.

In particolare nelle analisi sono state considerate le seguenti situazioni rappresentative:

- Condizioni statiche;
- Condizioni co-sismiche, ipotizzando che nel terreno potenzialmente liquefacibile in concomitanza delle massime azioni sismiche di calcolo le sovrappressioni interstiziali siano pari al 50% della tensione verticale efficace applicata in condizioni statiche; le condizioni sismiche sono state simulate con un'analisi pseudo-statica adottando i seguenti coefficienti di accelerazione orizzontale k_h e verticale k_v definite al precedente punto 4.2.1.1:
- Condizioni post-sismiche, ipotizzando che nel terreno potenzialmente liquefacibile i terreni siano effettivamente liquefatti e sia disponibile la sola resistenza residua calcolata adoperando, a seconda delle prove disponibili (CPT e/o SPT), le relazioni tra $q_{c1Ncs-Sr}$ e/o $(N_1)_{60cs-Sr}$ e resistenza residua S_r proposte da Idriss e Boulanger (2008).

Le analisi sono state effettuate con il metodo semplificato dell'equilibrio limite implementato nel software Slope/W (GEOSLOPE). Per tali analisi è stato adottato il metodo di Morgenstern e Price utilizzando tutti i parametri di default del software.

5.2.3 Valutazione degli spostamenti

Il codice Plaxis 2D è stato utilizzato nel presente documento per condurre le analisi di spostamento in campo statico costituenti le verifiche SLE richieste dalla Normativa per le opere in terreni sciolti.

Il calcolo dei cedimenti attraverso il codice Plaxis 2D è stato condotto utilizzando un modello costitutivo di tipo elasto-plastico con criterio di rottura alla Mohr Coulomb per le formazioni ghiaioso-sabbiose (G,S), un modello costitutivo di tipo Hardening (Hardening Soil Model) per l'unità L(S) e con un modello costitutivo tipo Cam Clay (Soft Soil Model), sempre con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb per le formazioni definite come coesive.

Attraverso questo calcolo è stato possibile ripercorrere la storia tenso-deformativa del sistema rilevato esistente-terreno di fondazione e valutare lo sviluppo nel tempo dei cedimenti di

consolidazione primaria dovuti alla costruzione del nuovo rilevato e alla successiva applicazione dei sovraccarichi dovuti al traffico ferroviario.

I parametri adottati nel calcolo sono quelli riportati al paragrafo relativo.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 28 di 188

6. CARATTERISTICHE DEL CORPO STRADALE FERROVIARIO

6.1 Descrizione dei rilevati ferroviari

Per quanto riguarda la geometria dei rilevati, si è fatto riferimento agli elaborati di progetto ad essi relativi ed in particolare alle sezioni trasversali, tipologiche e correnti.

In particolare i rilevati sono previsti con pendenza 3H:2V.

Al di sotto del rilevato è stato previsto uno scotico e bonifico per uno spessore pari a 1.0 m.

Per le scarpate è stata ipotizzata una finitura a verde.

Il rilevato è finito in sommità con la realizzazione di uno strato di super compattato di spessore pari a 30 cm, al di sopra del quale verrà realizzato uno strato di Sub-ballast di spessore pari a 12 cm.

Una volta completato il corpo del rilevato si posizioneranno ballast, traversine ed armamento ferroviario.

6.2 Materiali costituenti il rilevato

Per quanto riguarda il materiale costituente il corpo del rilevato è stato ipotizzato di ricorrere a materiale di natura granulare. Tale materiale dovrà avere le seguenti caratteristiche minime: peso specifico pari a 19 kN/m³, un angolo di attrito caratteristico ϕ'_k pari a 38° e coesione efficace nulla.

Lo strato di materiale supercompattato, di spessore pari a 30 cm, è caratterizzato da un peso specifico pari a 20 kN/m³, un angolo di attrito caratteristico ϕ'_k pari a 42° e coesione efficace nulla, mentre lo strato di Sub-ballast, di spessore pari a 12 cm, è caratterizzato da un peso specifico pari a 20 kN/m³, un angolo di attrito caratteristico ϕ'_k pari a 38° e coesione efficace pari a 600 kPa.

L'inerbimento superficiale delle scarpate non è stato considerato nelle analisi.

Una sintesi dei parametri geotecnici di calcolo per i materiali antropici è riportata alla successiva Tabella 10.

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 29 di 188

Tabella 10: Parametri geotecnici di calcolo – materiali costituenti il rilevato

STRATO	Spessore	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Modulo di Young operativo	Permeabilità
	[m]	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d M2	c'_k	c'_d M2	$E_{op.}$	k
		[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[m/s]
SUB-BALLAST	0.12	20	38	32	600	480	400	1x10 ⁻⁹
SUPER-COMPATTATO	0.3	20	42	36	0	0	60	1x10 ⁻⁹
RILEVATO	Variabile	19	38	32	0	0	30	1x10 ⁻⁵
STRATO DI BONIFICO	1.0	19	38	32	0	0	15	1x10 ⁻⁵

6.3 Carichi di progetto

I carichi di progetto considerati nelle analisi oggetto del presente documento sono i seguenti:

- Carico rappresentativo del pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine, rotaie).
- Sovraccarico rappresentativo del traffico ferroviario.
- Carico da azione sismica.

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14.4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0.80 m con un peso pari a 18.00 kN/m³. Il carico è stato applicato sulla sommità del rilevato per una larghezza complessiva di circa 10 m, escludendo le estremità laddove l'armamento non è effettivamente presente.

Il sovraccarico da traffico ferroviario è stato valutato in accordo a quanto riportato nel Doc. Rif. [9] per quanto riguarda il traffico normale (modello di carico LM71). In base a quanto indicato nella specifica di riferimento si è definita la pressione equivalente secondo le seguenti considerazioni:

- il carico dato dal treno LM71 risulta essere pari a 250 kN ad asse, con interasse pari a 1.6 m, (ossia $250/1.6 = 156.25$ kN/m);
- per riportare il carico ferroviario dalla traversina, di larghezza pari a 2.4 m, al piano al di sotto dell'armamento si è considerata una diffusione con pendenza 1:4. Pertanto la

pressione equivalente è stata valutata come applicata su una fascia di larghezza pari a 3 m, centrata in corrispondenza dell'asse della linea ferroviaria (ossia $156.25/3 = 52.08$ kPa). In caso di doppio binario si sono considerate due fasce di larghezza pari a 3 m in corrispondenza delle due vie di corsa. In particolare per

La pressione considerata è stata assunta pertanto pari a 52.1 kPa. Da amplificarsi, sempre in base a quanto indicato dal Doc. Rif. [9] con un coefficiente α pari a 1.1. Pertanto il valore di pressione risultante è pari a 57.3 kPa.

Per la definizione dell'azione sismica di progetto si rimanda al punto 4 del presente documento.

Tali carichi e sovraccarichi sono stati inseriti nelle diverse verifiche agli SLU (statiche e sismiche) e agli SLE applicando laddove necessario gli opportuni coefficienti parziali di amplificazione come previsti dalla Normativa vigente.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 31 di 188

7. CARATTERISTICHE DEGLI INTERVENTI DI TRATTAMENTO

In base alle caratteristiche delle opere in progetto in questa tratta e alla tipologia di terreni incontrati in sito, si possono riscontrare le seguenti problematiche da affrontare:

- cedimenti residui attesi per i rilevati di nuova costruzione durante la vita del rilevato stesso superiori al limite consentito di 5 cm in base a quanto indicato nei Doc. Rif. [9] e [11]
- Fattori di Sicurezza nei confronti della stabilità delle scarpate dei rilevati non soddisfacenti i requisiti minimi di normativa;
- presenza di materiali potenzialmente liquefacibili che, in concomitanza con l'evento sismico, possono mettere in discussione la stabilità del rilevato o generare cedimenti post-sisma ritenuti troppo elevati sia per l'opera ferroviaria sia per le opere adiacenti, il cui collasso può avere conseguenze sulla funzionalità dell'esercizio ferroviario in atto più gravi dei danni residui sulla piattaforma ferroviaria che saranno oggetto di successivo ripristino.

Al fine di risolvere tali problematiche si prevede, nell'ambito del progetto in esame, di poter utilizzare due tipologie diverse di trattamento del terreno: Colonne in Deep Mixing e Colonne di Ghiaia.

Nel seguito vengono presentate e descritte le due metodologie, con particolare riferimento alle caratteristiche specifiche delle due tecniche mirate alla risoluzione delle problematiche individuate.

7.1 Colonne in Deep Mixing

7.1.1 Descrizione della tecnica

Il trattamento in oggetto fa parte dei trattamenti colonnari che prevedono miscelazione profonda per mescolamento meccanico del terreno con miscele cementizie. Solitamente è identificato con il termine deep mixing oppure con gli acronimi DMM (Deep Mixing Method) o DCM (Deep Cement Mixing).

Si tratta di una particolare tecnica finalizzata a migliorare le caratteristiche meccaniche ed idrauliche del terreno miscelando lo stesso insieme ad un legante e/o ad altri materiali che vengono introdotti in forma secca o in forma umida (boiacca). Attualmente sono disponibili differenti metodi di miscelazione profonda, ognuno dei quali è conosciuto con un proprio nome in

funzione di come viene iniettato il legante (metodo secco e metodo umido) e di come viene eseguita la miscelazione. Il getto avviene a media-bassa pressione (20-40 bar).

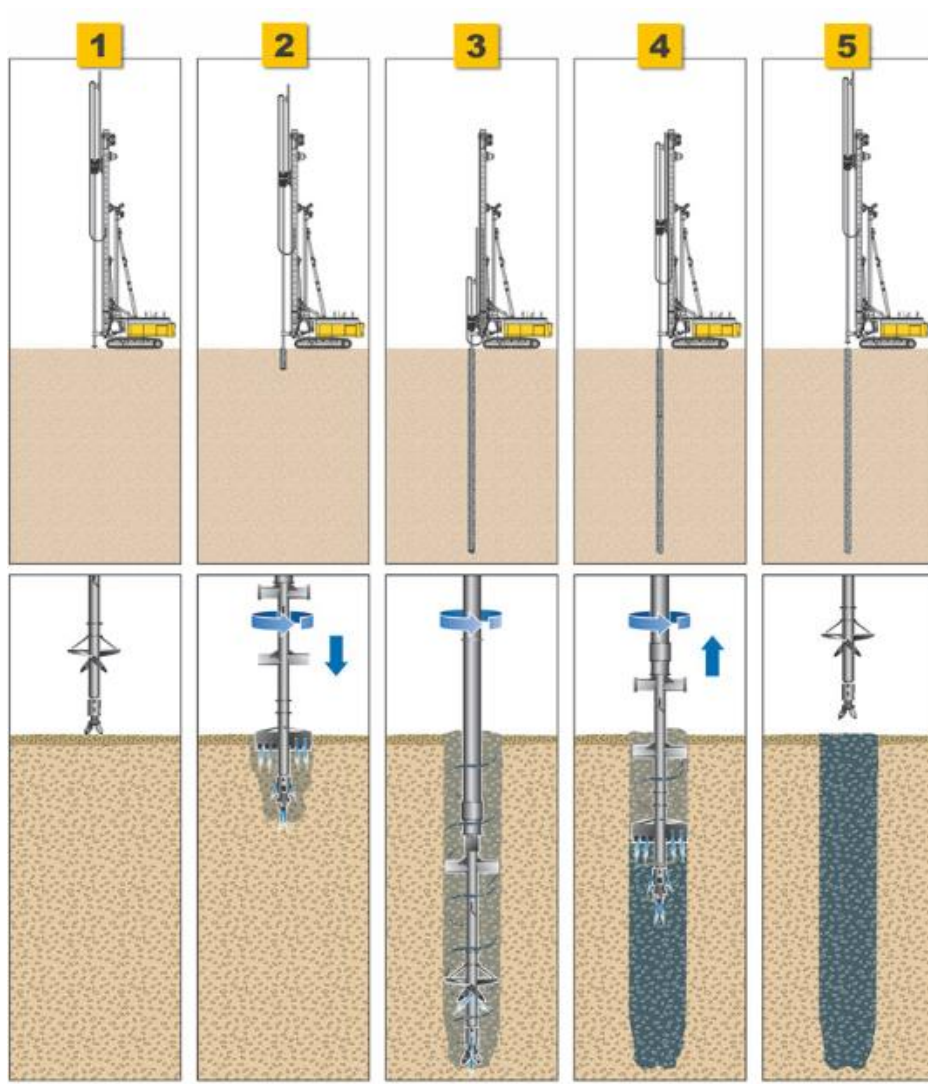


Figura 3: Schema di formazione colonne con la tecnica del deep mixing

Dry mixing

Il dry mixing è generalmente preferito per terreni limo-argillosi saturi, in virtù del loro elevato contenuto d'acqua necessario per sviluppare le reazioni di presa del legante. Ovviamente il

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 33 di 188

presupposto affinché possa avvenire la reazione di idratazione nel dry mixing è che il terreno sia immerso in falda o che comunque presenti un livello d'umidità sufficiente.

L'attrezzatura è costituita dal gruppo principale di perforazione e trattamento e da un gruppo di stoccaggio ed invio del legante in polvere; se necessario è presente anche un gruppo di alimentazione d'acqua per umidificare eventuali livelli aridi. La perforazione viene realizzata tramite una batteria di aste modulari cave, all'estremità della quale è montato l'utensile, con una doppia serie di lame, opportunamente sagomate. Durante la perforazione, eseguita con velocità di avanzamento e rotazione determinate in funzione della consistenza dei materiali da attraversare, le lame disgregano il terreno sino a portarlo ad una condizione prossima al limite liquido. In questa fase l'acqua necessaria per trattare i terreni aridi viene immessa in prossimità delle lame attraverso un'apposita conduttura. Ultimata la perforazione si inverte il senso di rotazione dell'utensile e si procede all'immissione del cemento attraverso gli ugelli posti in prossimità della zona di attacco delle lame all'asta. Il cemento viene trasportato da un flusso d'aria compressa utilizzando uno speciale dosatore che permette di immettere la quantità voluta di legante per metro cubo di volume trattato. In questa fase il cemento viene pertanto miscelato al terreno e la conformazione delle lame è tale da assicurare anche un costipamento verso il basso del materiale così miscelato. La qualità del prodotto viene assicurata dal controllo e dalla registrazione continua dei parametri operativi quali la velocità di avanzamento/recupero e di rotazione e la quantità di legante inviato per metro lineare di colonna.

Wet mixing

La tecnica di miscelazione per via umida consiste nella mescolazione in sito del terreno con una miscela a base di legante idraulico. L'attrezzatura è costituita da una macchina operatrice con una torre di perforazione costituita da una o più aste attrezzate con porzioni di spirale (terreni incoerenti) o lame (terreni coesivi). Ogni batteria termina con un utensile di perforazione provvisto di ugelli che consentono la fuoriuscita della miscela acqua-cemento necessaria. L'impianto di confezionamento e pompaggio prevede un agitatore dal quale la miscela viene inviata alle batterie di perforazione. Un sistema di rilevamento registra in continuo i seguenti parametri: pressione del circuito idraulico della macchina, velocità di rotazione, profondità, volume progressivo del fluido iniettato, portata e pressione dell'iniettore. La realizzazione degli elementi consolidati avviene

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 34 di 188

facendo penetrare nel terreno la batteria di attrezzi disagregatori sino alla quota di fine colonna; contemporaneamente alla discesa, dagli ugelli, viene iniettata la miscela cementizia ed è in questa fase che il terreno viene smosso e mescolato al legante. Terminata la perforazione, si inizia la fase di risalita invertendo il senso di rotazione della batteria ed eventualmente iniettando ulteriore miscela (eseguendo con ciò un'azione di compattazione del volume già trattato).



Figura 4: Particolare pulizia ugelli in wet deep mixing

Il volume di terreno trattato con deep mixing ha forma cilindrica, se si adotta la classica attrezzatura di scavo e iniezione della miscela ad elica (continua o discontinua), oppure una forma parallelepipedica a pannelli se si adotta una coppia di ruote fresanti. Nel nostro caso sono previste colonne di diametro 600 mm.

Per quanto riguarda la tecnica di miscelazione, vista la tipologia di materiali presenti e l'elevazione della falda, si ritiene preferibile adottare il dry-mixing.

Una volta eseguite le colonne di trattamento si provvederà a stendere uno strato di ripartizione, di spessore indicativo pari ad 1 m, costituito da materiale granulare opportunamente selezionato su cui costruire il rilevato ferroviario.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 35 di 188

Per tutti i dettagli dell'intervento e delle varie parti che lo compongono si rimanda ai plano-profili e alle sezioni tipologiche che fanno parte degli elaborati di progetto.

7.1.2 Dimensionamento dell'intervento

Da un punto di vista del dimensionamento dell'intervento si adottano due metodi diversi a seconda della funzione principale richiesta all'intervento: riduzione dei cedimenti dati dalla presenza di materiale cedevole o aumento delle caratteristiche di resistenza del materiale per eliminare il rischio di potenziale liquefazione e limitare i danni post-sisma.

1) Dimensionamento per riduzione dei cedimenti

In questo caso si procede nel seguente modo:

- si individua la sezione per la quale la valutazione dei cedimenti attesi in assenza di interventi risulta essere non compatibile con la funzionalità dell'opera e/o con la manutenzione ordinaria prevista;
- si ipotizza un trattamento, selezionando un diametro della colonna, un interasse e una profondità di intervento, valutata a partire dai calcoli dei cedimenti attesi di cui al punto precedente;
- si procede alla valutazione dei parametri di deformabilità equivalenti da associare al terreno trattato. Tale valutazione avviene mediante un calcolo con un modello assial-simmetrico ad elementi finiti, rappresentativo della singola colonna realizzata in Deep Mixing e del volume di terreno circostante che ricade nella zona di influenza della colonna stessa calcolato in funzione dell'interasse del trattamento;
- si calcolano nuovamente i cedimenti attesi per la sezione individuata, inserendo al di sotto dell'opera un volume di terreno rappresentativo del trattamento, a cui sono associati i parametri di deformabilità definiti al punto precedente;
- se i cedimenti così calcolati in presenza di trattamento risultano accettabili il dimensionamento dell'intervento è concluso, qualora non lo fossero perché ritenuti ancora troppo elevati, o al contrario, troppo bassi, si procede con una nuova ipotesi di intervento e si ripete la procedura.

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 36 di 188

2) Dimensionamento per eliminazione rischio liquefazione

Innanzitutto si precisa che, mentre per gli interventi con colonne in Deep mixing mirati a ridurre i cedimenti si propongono maglie di trattamento omogenee classiche (quadrate o a quinconce), per i trattamenti mirati a modificare le caratteristiche di resistenza del terreno naturale, fino a renderlo non più liquefacibile, si preferisce adottare un sistema di celle chiuse (setti perpendicolari tra loro) che con la loro geometria garantiscono maggiormente di offrire la resistenza al taglio prevista durante l'evento sismico (si veda a tal proposito le esperienze di Taki et al. 1991, Matsuo et al. 1996, Hausler et al. 2001 e Yamashita et al. 2008).

In questo caso si procede nel seguente modo:

- innanzitutto si verifica che le tensioni tangenziali indotte dal sisma possano essere adeguatamente assorbite dalla resistenza al taglio delle colonne di terreno trattato. Tale verifica viene effettuata calcolando il fattore di sicurezza disponibile dal rapporto tra $R_{tr,d}$ (capacità di resistenza a taglio delle colonne) ed E_d (forza indotta dal sisma).

$$FS = R_{tr,d} / E_d \geq 1.25$$

L'azione E_d viene calcolata in accordo alla procedura semplificata proposta da Seed e Idriss (1971) secondo cui il valore della tensione tangenziale di picco massima ad una data profondità è data dalla seguente espressione:

$$\tau_{max} = a_{max}/g * \sigma_v * r_d * 1/C_m$$

Dove:

a_{max} = accelerazione di picco massima

g = accelerazione di gravità

σ_v = pressione verticale totale alla quota di interesse

r_d = coefficiente di riduzione funzione della profondità di verifica = $(1 - 0.015 * z)$

C_m = fattore di conversione della magnitudo in accordo a Seed

Sempre in accordo a Seed e Idriss la tensione tangenziale ciclica media vale:

$$\tau_{cyc} = 0.65 * \tau_{max}$$

Pertanto le forze di taglio risultanti nell'area trattata A risultano essere:

$$E_{d, \max} = \tau_{\max} * A$$

$$E_{d, \text{cyc}} = \tau_{\text{cyc}} * A$$

Per la valutazione della resistenza a taglio disponibile si procede come segue:

Si considera di adottare un dosaggio di cemento predefinito e, in accordo alle correlazioni suggerite da Taki et al. 1991 (Figura 5), si valuta la resistenza a compressione non confinata q_u delle colonne.

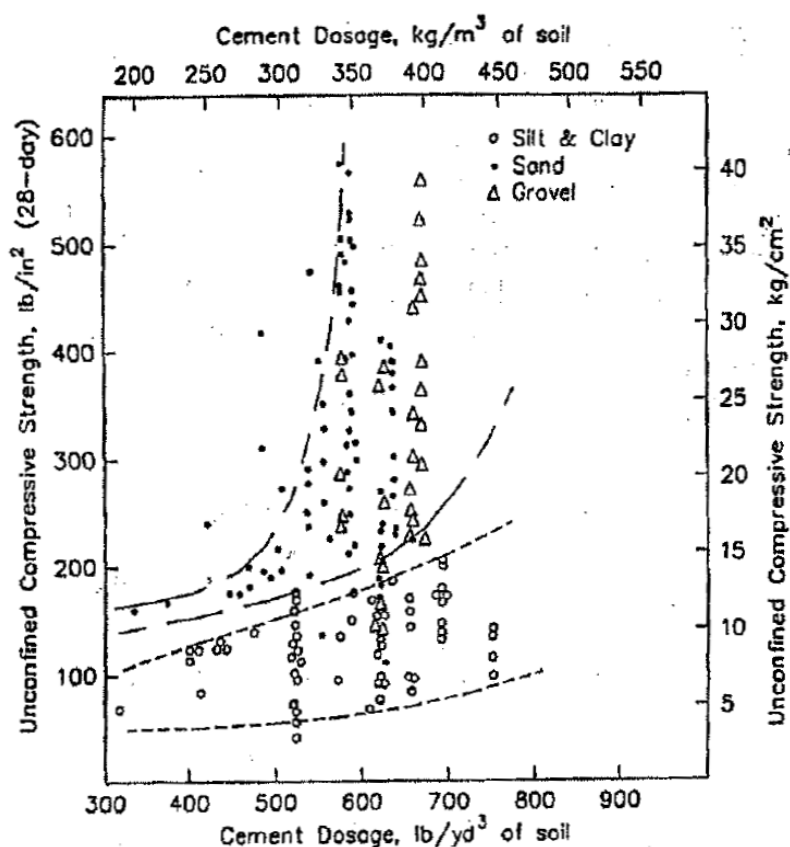


Figura 5: Resistenza del terreno trattato a cemento in funzione del dosaggio di cemento (Taki e Yang, 1991)

Utilizzando poi la relazione tra resistenza a compressione non confinata e resistenza al taglio proposta da Saitoh et al. 1980, secondo cui:

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 38 di 188

$$\tau_{rd} = 0.53 + 0.37 * q_u - 0.0014 * q_u^2$$

Quindi considerando l'area trattata A si ottiene la resistenza al taglio disponibile pari a:

$$R_{tr,d} = \tau_{rd} * A$$

- Successivamente si procede alla determinazione dei parametri di resistenza equivalenti da associare al volume di terreno trattato con le colonne e da utilizzare nelle verifiche di stabilità per valutare se, con la presenza del trattamento, le condizioni di stabilità in condizioni co-sismiche e post-sismiche siano soddisfacenti.

I parametri equivalenti vengono stimati omogeneizzando in funzione della percentuale di trattamento areale che viene eseguito, considerando che il terreno equivalente mantenga l'angolo di attrito interno del terreno di partenza e che la colonna cementata contribuisca, per la quota di pertinenza, con una coesione che dipende dal dosaggio di cemento usato nella miscelazione.

In particolare la coesione della colonna viene valutata a partire dal valore di resistenza a compressione non confinata della colonna q_u che dipende appunto dal dosaggio di cemento. Tale valore di partenza è quello usato per la verifica a liquefazione al punto precedente e proviene dal grafico di Taki et al. (1991) (Figura 5). Considerando che questo grafico riporta valori relativi a risultati di prove di laboratorio, si ipotizza di adottare una riduzione di tale valore, per tenere conto della effettiva resistenza disponibile in sito rispetto a quanto ottenuto da campioncini provati in laboratorio, e a partire da questa resistenza a compressione non confinata della colonna q_{u_sito} si calcola la coesione della colonna come $c = q_{u_sito} / 2$.

Per quanto riguarda i parametri di deformabilità si rimanda alla procedura descritta al precedente punto "Dimensionamento per riduzione dei cedimenti".

7.2 Colonne di Ghiaia

7.2.1 Descrizione della tecnica

Il trattamento in oggetto prevede di realizzare il miglioramento delle proprietà del terreno in sito mediante colonne di ghiaia realizzate con vibro-replacement mediante la tecnica con immissione

della ghiaia a secco a fondo foro. Dove praticabili, infatti, tali tecniche risultano le più veloci ed economiche. Tuttavia, l'ingombro e gli spazi di manovra delle macchine (si veda la Figura 6), la necessità di alimentarle con apporti solidi (sabbia/ghiaia) con il rischio di caduta di tali materiali sulla sede ferroviaria, le dimensioni delle aree di disturbo create in superficie potrebbero rendere queste tecniche applicabili solo limitatamente nel caso in esame e dovendo prevedere opportune protezioni laddove si eseguissero in prossimità della linea esistente in esercizio.



Figura 6: Tipica attrezzatura per colonne di ghiaia con immissione della ghiaia a secco a fondo foro

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 40 di 188

In dettaglio, si utilizza il vibro a carica pneumatica, dove il materiale ghiaioso di apporto fuoriesce direttamente, sotto pressione d'aria, alla punta dell'utensile (metodo Bottom Feed a secco). L'infissione a secco è ottenuta grazie ad un tirabasso montato su specifica torreguida.

L'azione del tirabasso comporta una ottimale compattazione della colonna in ghiaia (attivazione) ed una estensione in profondità dell'addensamento oltre la massima profondità raggiunta. La colonna viene formata per passi successivi di estrazione, fuoriuscita e schiacciamento della ghiaia sia verso il basso, sia lateralmente. In questo modo si ottengono elementi colonnari che, interagendo con il terreno contribuiscono al miglioramento della capacità portante delle stratificazioni consolidate, sostengono i carichi e consentono la limitazione dei cedimenti attesi nei limiti di progetto.



Figura 7: Tipica attrezzatura per colonne di ghiaia con immissione della ghiaia a secco a fondo foro – Dettaglio della punta dell'utensile (nota ugelli per l'iniezione di acqua o aria) e tubo di consegna ghiaia

Il metodo a secco, senza fluidi di perforazione, associato all'utilizzo di sola ghiaia naturale consente di operare nelle condizioni di massima compatibilità ambientale.

La tecnologia è particolarmente adatta a risolvere problematiche di mitigazione del rischio liquefazione grazie a tre effetti: l'irrigidimento del terreno per la presenza delle colonne di ghiaia, la

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 41 di 188

compattazione del terreno intercluso tra le colonne, il drenaggio che garantisce la dissipazione delle sovrappressioni interstiziali.

A completamento dell'intervento, al di sopra delle colonne, verrà realizzato uno strato di ripartizione dei carichi, costituito da materiale granulare selezionato, previa interposizione di un geotessuto di separazione, in modo da creare un cuscino tra il terreno trattato e la struttura sovrastante (rilevato o fondazione).

7.2.2 Dimensionamento dell'intervento

Al contrario di quanto visto per il trattamento in deep mixing, per le colonne di ghiaia si adotta un unico metodo di dimensionamento che permette di definire sia i parametri di deformabilità per una efficace riduzione dei cedimenti dati dalla presenza di materiale cedevole, sia i parametri di resistenza per garantire la stabilità ed eliminare il rischio di potenziale liquefazione.

La dimensione delle colonne e la spaziatura tra esse necessarie per raggiungere gli obiettivi di progetto sono calcolate secondo il metodo proposto da Priebe (1998). Il metodo prende in considerazione il rinforzo del terreno dato dalla presenza delle colonne, ma trascura gli effetti benefici della possibilità di drenaggio fornito dalle colonne costituite da materiale grossolano e della compattazione (addensamento) del materiale tra le colonne stesse. Pertanto l'applicazione di questo metodo in cui si utilizzano quali dati di partenza i risultati delle indagini pre-trattamento, costituisce una stima conservativa dell'efficacia reale dell'intervento.

La procedura di dimensionamento prevede di ipotizzare una densità di trattamento (diametro della colonna e spaziatura dell'intervento) che corrisponde ad un rapporto r tra area del trattamento A e area della colonna A_c

Dove: $r = A / A_c$

Con questo valore di rapporto A / A_c si valuta, in base al grafico proposto da Priebe e riportato nella successiva Figura 8, il valore di CSR (cyclic stress ratio) residuo come frazione della CSR totale. Il beneficio dato dalla presenza del trattamento con colonne di ghiaia è valutato quindi come riduzione dell'azione CSR agente e pertanto può essere espresso anche come riduzione della PGA. Se la verifica a liquefazione dell'area condotta nuovamente con il nuovo valore ridotto di PGA risulta soddisfatta, allora l'intervento è dimensionato correttamente e si considera che l'effetto

benefico dato dalla presenza delle colonne di ghiaia sia tale da non permettere nemmeno l'innescio del fenomeno di liquefazione.

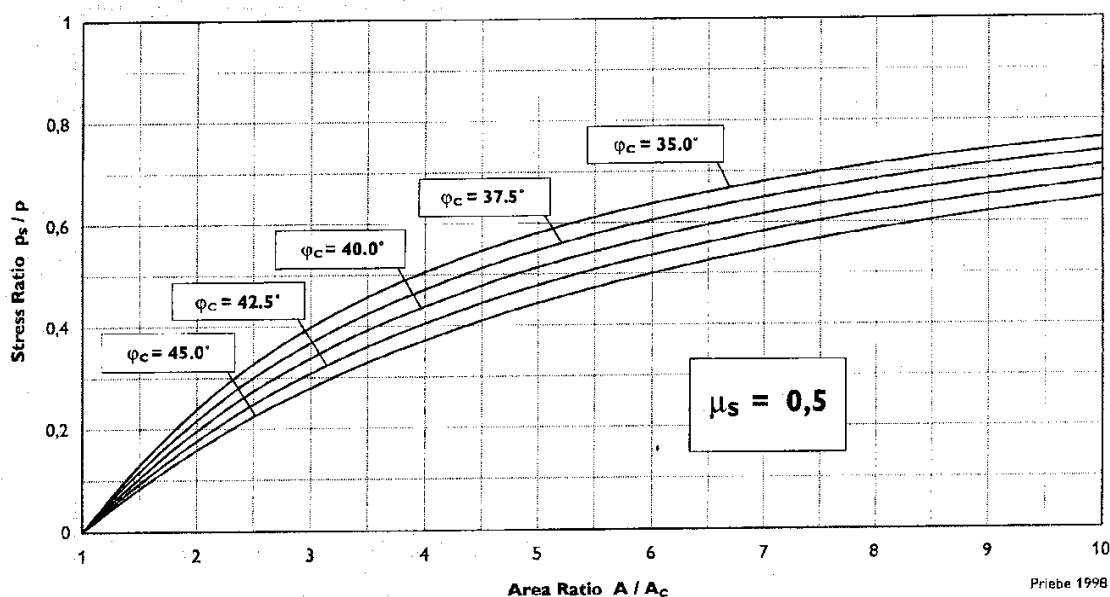


Figura 8: Grafico per stimare la resistenza residua da associare al terreno tra le colonne (Priebe 1998)

Una volta che l'intervento è dimensionato, sempre facendo riferimento alle teorie proposte da Priebe (1995), a partire dai parametri della colonna (diametro, spaziature, modulo di deformabilità, angolo di attrito interno del materiale costituente la colonna) e dai parametri del terreno naturale in sito (spessore dei diversi strati attraversati, pesi specifici, moduli di deformabilità, angoli di attrito interno dei diversi strati) è possibile determinare i parametri equivalenti da associare al volume di terreno trattato.

Per il dettaglio sulla procedura di calcolo si rimanda all'articolo suddetto.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 43 di 188

8. SELEZIONE DELLE SEZIONI DI CALCOLO SIGNIFICATIVE

Oggetto della presente relazione sono i rilevati lungo la tratta di linea ferroviaria compresa tra il km 1+250 e il km 4+500. La sede ferroviaria si sviluppa in rilevato per i primi 300 m partendo da un'altezza massima di progetto di circa 2.5 m, prosegue pressoché a raso con il livello del terreno naturale tra il km 1+550 e 2+000 e nuovamente in rilevato fino dal km 2+000 al km 4+500 raggiungendo una altezza massima di progetto di circa 3 m in prossimità del km 2+700. Per tale motivo, unitamente al potenziale rischio di liquefazione valutato nella tratta compresa tra il km 2+650 e il km 3+100, come riportato in Tabella 9, si è scelto di selezionare la sezione al km 2+700 come la più significativa per effettuare i calcoli dei cedimenti attesi nel corso della vita utile dell'opera e le verifiche di stabilità in condizioni statiche, co-sismiche e post-sismiche, tenendo conto anche della presenza di un materiale suscettibile a liquefazione che potrebbe alterare le condizioni di stabilità del sistema.

Per quanto riguarda invece la tratta tra il km 1+480 ed il km 1+900, dove era stata evidenziata la presenza di materiale potenzialmente liquefacibile, è stato valutato, vista la bassa pericolosità e la relativa profondità dello strato liquefacibile, di non realizzare alcun intervento di trattamento. Trattandosi poi di un tratto in cui la linea ferroviaria è a raso, non risulta nemmeno essere una zona di interesse per verifiche di cedimento o stabilità.

Nel seguito sono riportate le verifiche relative alla sezione individuata per la quale è stata definita la stratigrafia di riferimento ed i relativi parametri geotecnici di progetto, per la cui definizione si rimanda alla Relazione Geotecnica (Doc. rif. [1]).

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 44 di 188

9. SEZIONE DI CALCOLO ALLA PROGRESSIVA 2+700

9.1 Stratigrafia e parametri geotecnici di calcolo

In accordo a quanto riportato nella Relazione Geotecnica (Doc. rif.[1]) e sulla base di quanto descritto nel Cap. 3, nella Tabella 11 e Tabella 12 sono riportati la stratigrafia ed i valori dei parametri geotecnici caratteristici e di progetto, fattorizzati utilizzando i coefficienti M2 contenuti nella Tabella 4 della presente relazione.

Si rimanda invece alla Tabella 10 per i valori dei parametri geotecnici relativi ai materiali antropici utilizzati per il corpo del rilevato, per lo strato di bonifico (100 cm al di sotto del rilevato) e per il pacchetto di armamento ferroviario.

Si ricorda che, come definito al Cap. 7 del Doc. Rif.[4], le verifiche geotecniche SLU di stabilità globale dei rilevati, in campo statico, richiedono l'adozione della sola Combinazione 2 dell'Approccio 1 e pertanto l'applicazione dei soli coefficienti parziali M2, mentre per le verifiche sismiche e per le verifiche SLE, finalizzate alla determinazione dei cedimenti, sono richiesti i parametri caratteristici.

Tabella 11: Stratigrafia di calcolo per la sezione 2+700

Strato	Profondità da [m da p.c.]	Profondità a [m da p.c.]	Descrizione
R	0.0	0.7	Riporto
A,L1	0.7	3.7	L,A; L(A)[S]
L(S)	3.7	6.7	L(S); L(S)[A]
G,S	6.7	10.7	S; S(G);G(S);G
A,L2	10.7	17.7	A(L),L(A)
L,A2	17.7	28.7	L(A); L(A)[S]; L(A),S
L,A1	28.7	32.7	L(A); L(A)[S]
G,S	32.7	39.3	S; S(G);G(S);G
M	39.3	-	A(M); M

Tabella 12: Parametri geotecnici di calcolo per la sezione 2+700 – Materiali in sito

STRATO	Peso di volume	Angolo di resistenza al taglio		Coesione efficace		Resistenza al taglio non drenata		Modulo di Young operativo	Rapporto di compressione	Rapporto di ricompressione	Permeabilità
	γ_d	ϕ'_k	ϕ'_d M2	c'_k	c'_d M2	c_u	c_u M2	$E_{op.}$	CR	RR	k
	[kN/m ³]	[°]	[°]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[MPa]	[-]	[-]	[m/s]
R	19	32	25.5	0	0	-	-	15	-	-	-
A,L1	18	22	17.9	10	8	80-100	64-80	-	0.15	0.01	1.00E-09
L(S)	19	30	24	0	0	-	-	3-4	-	-	1.00E-06
G,S	19	36	28.8	0	0	-	-	10-30	-	-	1.00E-04
A,L2	17.5	20.5	16.65	5	4	30-40	24-32	7	0.19	0.03	1.00E-09
L,A2	19	27	22.2	0	0	30-60	24-48	-	0.14	0.017	1.00E-06
L,A1	18.5	23.5	19.2	12	9.6	60	48	-	0.20	0.04	1.00E-07
G,S	19	36	28.8	0	0	-	-	50	-	-	1.00E-04
M	21	26	20.8	20	16	150-400	120-320	-	0.10	0.017	1.00E-09

La falda di progetto è stata assunta nei calcoli ad una quota di circa 8 m slm.

Da un punto di vista della stabilità nei confronti della liquefazione, come anticipato nei paragrafi precedenti, la sezione di calcolo alla progressiva 2+700 ricade in un tratto in cui le verifiche condotte, sulla base dei risultati delle indagini in sito disponibili, hanno dato esito positivo e pertanto vi è presenza di materiale potenzialmente liquefacibile.

In particolare è stato individuato come liquefacibile lo spessore di terreno compreso tra 3.5 m e 6.5 m di profondità da base rilevato a cui è stata associata l'unità geotecnica A,L1 per i primi 0.4 m e l'unità geotecnica L(S) per lo spessore residuo.

Pertanto per questa sezione le verifiche di stabilità in condizioni sismiche sono state condotte secondo la procedura esplicitata al precedente paragrafo 5.2.2 e, sempre secondo quanto indicato al medesimo paragrafo, per il materiale indicato come liquefacibile sono stati definiti i parametri di resistenza residua da utilizzare nelle verifiche.

I parametri di resistenza residua per il materiale potenzialmente liquefacibile per le verifiche a liquefazione sono stati valutati considerando che in condizioni post-sismiche i terreni siano effettivamente liquefatti e sia disponibile la sola resistenza residua, valutabile adoperando, a

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 46 di 188

seconda delle prove disponibili, le relazioni tra $q_{c1Ncs-Sr}$ o $(N_1)_{60cs-Sr}$ e resistenza residua S_r proposte da Idriss e Boulanger (2008).

In particolare, dall'interpretazione delle prove CPT è stato calcolato un valore di q_{c1Ncs} per il materiale L(S) nello strato di interesse compreso tra 55 kPa e 70 kPa e un valore di $(N_1)_{60cs}$ pari a 10 perciò si ipotizza che a seguito della liquefazione i terreni in esame siano caratterizzati da valori di $S_r \approx 0.09 \sigma'_v$. Nelle analisi ciò si traduce assegnando un angolo di attrito fittizio massimo pari a $\phi'_k = \tan^{-1}(0.09)=5.5^\circ$ per L(S)1 e $\phi'_k = \tan^{-1}(0.08)=4.3^\circ$ per A,L1.

9.2 Verifiche SLU – Stabilità globale

Le verifiche SLU della stabilità globale del rilevato (sia in condizioni statiche che sismiche) sono state condotte tramite il codice di calcolo Slope/W (Doc. Rif. [1]). Le combinazioni di carico adottate nelle analisi fanno riferimento rispettivamente ai coefficienti parziali (A2+M2) per le analisi in campo statico e ai valori caratteristici per le analisi sismiche. Tali coefficienti sono contenuti nella Tabella 1 e nella Tabella 4 della presente relazione.

Come da NTC 2018 (Doc. Rif. [7]), la verifica SLU di stabilità globale è soddisfatta se la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.1$$

è verificata in condizioni statiche e la relazione:

$$FS \geq R2 = 1.2$$

È verificata in condizioni sismiche.

Il coefficiente R2 è contenuto nella Tabella 5 della presente relazione.

9.2.1 Verifiche SLU in condizioni statiche

L'analisi di stabilità globale in campo statico del rilevato tipologico con altezza pari a 2.70 m è stata condotta in accordo alla combinazione DA1C2 assumendo i parametri geotecnici M2 di cui in [7] e in Tabella 10 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

Il carico da traffico ferroviario (q), assunto pari a 57.3 kPa, è stato modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 47 di 188

è di tipo variabile/sfavorevole pertanto, in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Qi} [A2] = 57.3 \text{ kPa} \times 1.3 = 74.5 \text{ kPa}.$$

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14,4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0,80 m con un peso pari a 18,00 kN/m³. Tale carico è di tipo permanente sfavorevole pertanto in accordo al coefficiente parziale sulle azioni A2 riportato in Tabella 1; il valore di calcolo è stato assunto pari a:

$$q_d = q_k \times \gamma_{Gi} [A2] = 14.4 \text{ kPa} \times 1.3 = 18.72 \text{ kPa}.$$

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita critica quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

In Figura 9, sono riportate le superfici di rottura critica per la combinazione DA1C2; il fattore di sicurezza FS relativo a tali meccanismi, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{\text{MIN}} (DA1C2) = 1.904$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{\text{MIN}} \geq R2 = 1.1,$$

la verifica di stabilità globale in campo statico risulta soddisfatta.

9.2.2 Verifiche SLU in condizioni sismiche (co-sismica)

L'analisi di stabilità globale in campo sismico del rilevato tipologico con altezza pari a 2.70 m alla sezione 2+700 è stata condotta assumendo i parametri geotecnici caratteristici di cui in Tabella 12 e in Tabella 10 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

In accordo a quanto riportato al punto 4, la forza sismica è stata modellata tramite i coefficienti sismici:

$$K_H = + 0.098 \quad (\text{concorde alla direzione di scivolamento})$$

$$K_V = \pm 0.049 \quad (\text{verificando la più cautelativa tra negativo e positivo})$$

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 48 di 188

In base alla procedura esplicitata al precedente paragrafo 5.2.2, per la condizione concomitante il sisma (co-sismica) si ipotizza che nel terreno potenzialmente liquefacibile in concomitanza delle massime azioni sismiche di calcolo le sovrappressioni interstiziali siano pari al 50% della tensione verticale efficace applicata in condizioni statiche. Quanto detto si traduce in un valore del rapporto di sovrappressioni interstiziali r_u pari a 0.30 da assegnare allo strato di materiale A,L1 e allo strato di materiale L(S) suscettibili a liquefazione.

Il carico ferroviario (q), assunto pari a 57.3 kPa, è stato moltiplicato per un coefficiente $\psi=0.2$ in accordo a Doc. Rif. [7] e modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [7]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = 0.2q_k = 11.45 \text{ kPa.}$$

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14,4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0,80 m con un peso pari a 18,00 kN/m³. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [7]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = q_k = 14.4 \text{ kPa.}$$

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita "critica", quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

In Figura 10 e Figura 11 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{MIN}=2.015$$

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 49 di 188

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{MIN} \geq R2 = 1.2,$$

la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.

9.2.3 Verifiche SLU in condizioni di terreno liquefatto (post-sismica)

L'analisi di stabilità globale della situazione immediatamente successiva all'evento sismico per il rilevato tipologico con altezza pari a 2.70 m alla sezione 2+700 è stata condotta assumendo i parametri geotecnici caratteristici di cui in Tabella 12 e in Tabella 10 rispettivamente per i materiali in sito e per i materiali antropici.

In base alla procedura esplicitata al precedente paragrafo 5.2.2, per la condizione immediatamente successiva al sisma (post-sismica) si ipotizza che nel terreno potenzialmente liquefacibile i terreni siano effettivamente liquefatti e sia disponibile la sola resistenza residua. Pertanto nel calcolo si sono adottati i parametri residui definiti al precedente punto 9.1

Il carico ferroviario (q), assunto pari a 57.3 kPa, è stato moltiplicato per un coefficiente $\psi=0.2$ in accordo al Doc. Rif. [7] e modellato come un carico distribuito applicato in corrispondenza delle impronte delle traversine ferroviarie. Tale sovraccarico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [7]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = 0.2 q_k = 11.45 \text{ kPa.}$$

L'armamento ferroviario è stato schematizzato per mezzo di una pressione uniformemente distribuita pari a 14,4 kPa, rappresentativo di uno strato di spessore pari a circa 0,80 m con un peso pari a 18,00 kN/m³. Tale carico è stato inserito nei calcoli col proprio valore caratteristico in accordo a quanto specificato dalle NTC 2018 (vedasi Par.7.11.1 del Doc. Rif. [7]) che indicano per le analisi in condizioni sismiche di porre tutti pari ad uno i coefficienti parziali sulle azioni. Pertanto:

$$q_d = q_k = 14.4 \text{ kPa.}$$

L'analisi di stabilità globale è stata finalizzata all'individuazione delle superfici di rottura tali da intercettare il carico ferroviario. Tra esse, è definita "critica", quella a cui corrisponde il fattore di sicurezza FS minimo.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 50 di 188

Si sottolinea che nella ricerca delle superfici di rottura critiche sono state escluse tutte quelle superfici di spessore ridotto e che non interessano la sede ferroviaria.

In Figura 12 è riportata la superficie di rottura critica; il fattore di sicurezza FS relativo a tale meccanismo, e quindi il minore tra tutti i fattori di sicurezza FS calcolati, è pari a:

$$FS^{MIN}=2.31$$

Essendo soddisfatta la relazione:

$$FS^{MIN} \geq R2 = 1.2,$$

la verifica di stabilità globale in campo sismico risulta soddisfatta.

RADDOPPIO FERROVIARIO PESCARA P.N.-CHIETI (LOTTO 1)

Analisi di stabilità di rilevati

Sezione pk 2+700

Condizioni statiche A2+M2

Sovraccarico permanente armamento 18.72 kPa

Sovraccarico Ferroviario 74.5 Kpa

Name: A,L1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18 kN/m³	Cohesion: 8 kPa	Phi: 17.9 °
Name: A,L2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 17.5 kN/m³	Cohesion: 4 kPa	Phi: 16.65 °
Name: L,A2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 22.2 °
Name: G,S	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 28.8 °
Name: R	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °
Name: SC	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °
Name: SB	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m³	Cohesion: 600 kPa	Phi: 32 °
Name: L(S)	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30 °
Name: Riporto	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 25.6 °

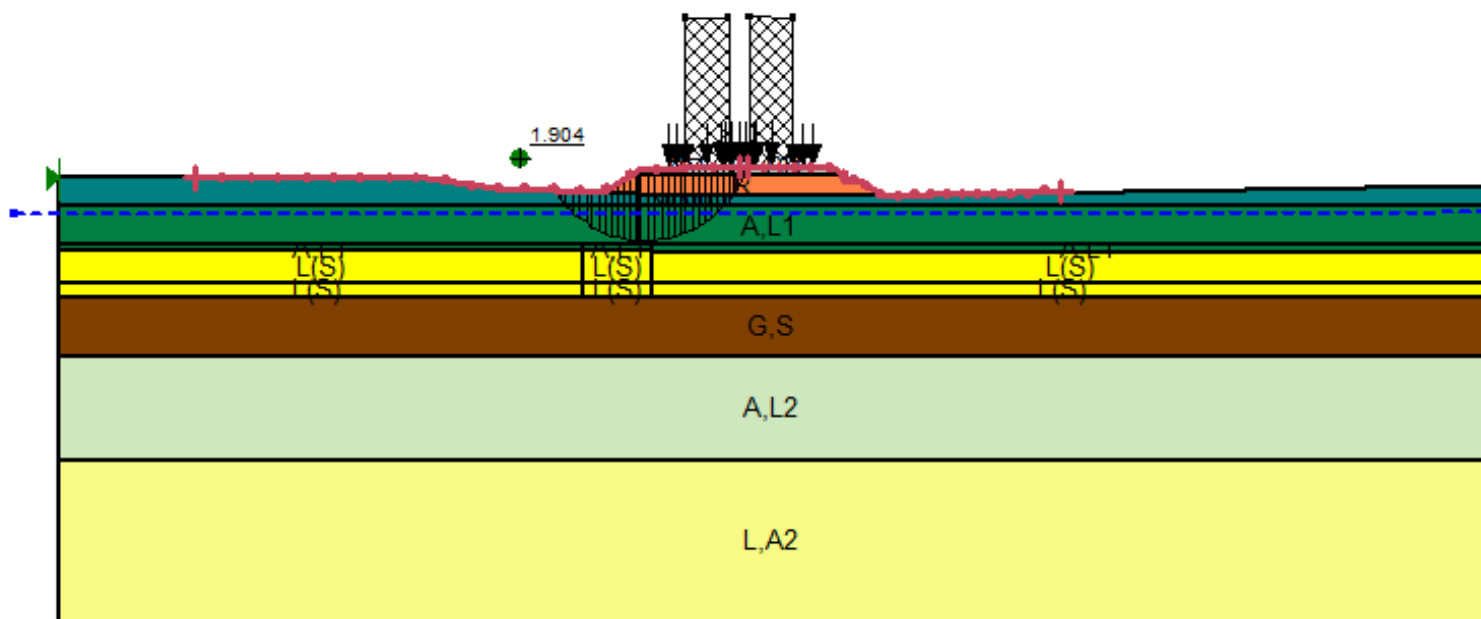


Figura 9: Rilevato H=2.70 m, sez. 2+700 - Analisi di stabilità globale in campo statico DA1C2

RADDOPPIO FERROVIARIO PESCARA P.N.-CHIETI (LOTTO 1)

Analisi di stabilità di rilevati

Sezione pk 2+700

Condizioni co-sismiche $k_h=0.098$ $k_v=-0.049$

Sovraccarico permanente armamento 14.4 kPa

Sovraccarico Ferroviario 11.45 KpA

Name: A,L1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18 kN/m³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 22 °	
Name: A,L2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 17.5 kN/m³	Cohesion: 5 kPa	Phi: 20.5 °	
Name: L,A2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 27 °	
Name: G,S	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 36 °	
Name: R	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	
Name: SC	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 42 °	
Name: SB	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m³	Cohesion: 600 kPa	Phi: 38 °	
Name: L(S)	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30 °	
Name: Riporto	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	
Name: LIQ1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 22 °	Ru: 0.3
Name: LIQ2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30 °	Ru: 0.3

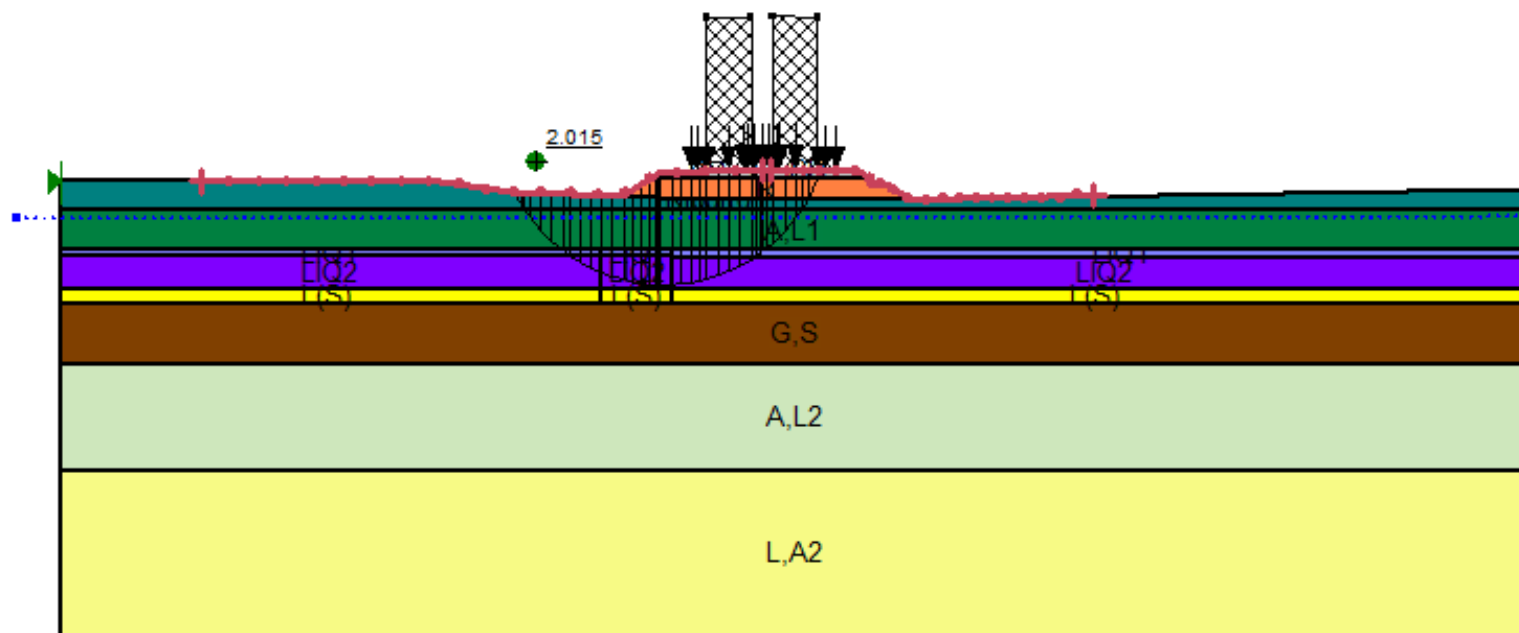


Figura 10: Rilevato $H=2.70$ m, sez. 2+700 - Analisi di stabilità globale in campo sismico-condizioni co-sismiche (+)

RADDOPPIO FERROVIARIO PESCARA P.N.-CHIETI (LOTTO 1)

Analisi di stabilità di rilevati

Sezione pk 2+700

Condizioni co-sismiche $k_h=0.098$ $k_v=0.049$

Sovraccarico permanente armamento 14.4 kPa

Sovraccarico Ferroviario 11.45 KpA

Name: A,L1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18 kN/m ³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 22 °	
Name: A,L2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 17.5 kN/m ³	Cohesion: 5 kPa	Phi: 20.5 °	
Name: L,A2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 27 °	
Name: G,S	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	
Name: R	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °	
Name: SC	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 42 °	
Name: SB	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m ³	Cohesion: 800 kPa	Phi: 38 °	
Name: L(S)	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30 °	
Name: Riporto	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °	
Name: LIQ1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 22 °	Ru: 0.3
Name: LIQ2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m ³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30 °	Ru: 0.3

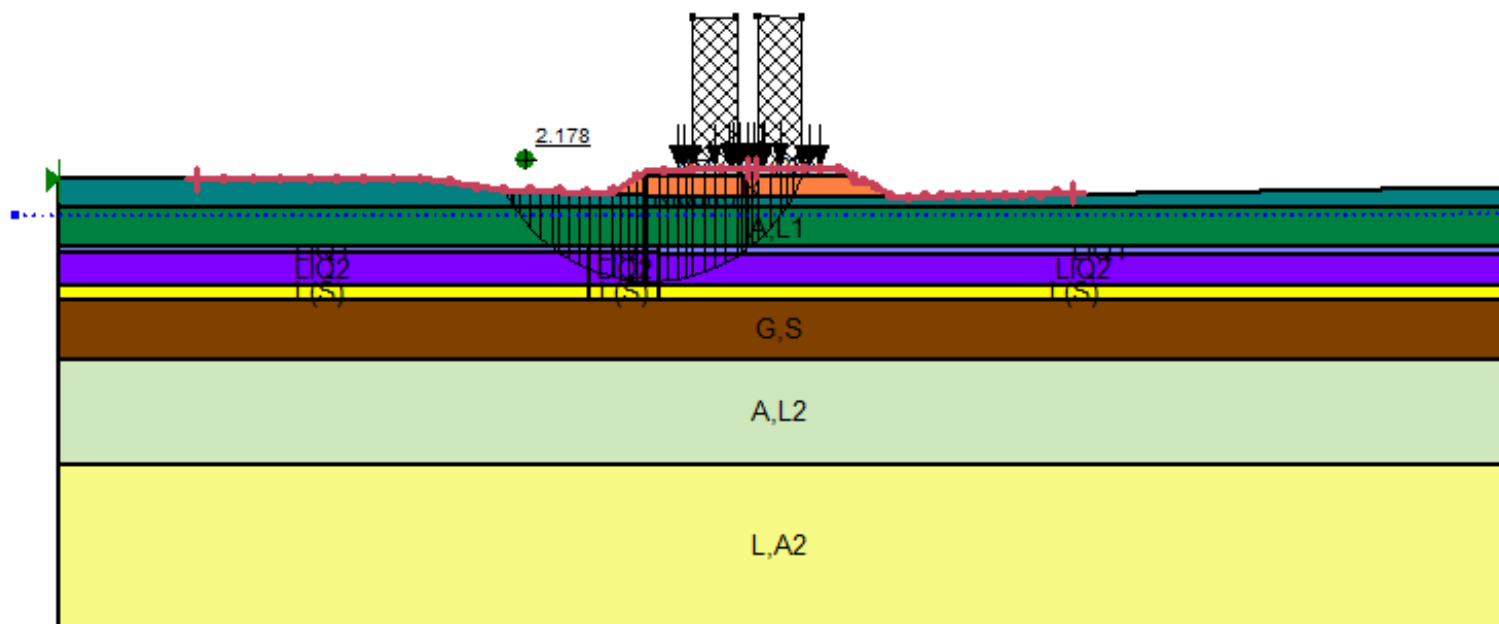


Figura 11: Rilevato H=2.70 m, sez. 2+700 - Analisi di stabilità globale in campo sismico - condizioni co-sismiche (-)

RADDOPPIO FERROVIARIO PESCARA P.N.-CHIETI (LOTTO 1)

Analisi di stabilità di rilevati

Sezione pk 2+700

Condizioni post-sismiche

Sovraccarico permanente armamento 14.4 kPa

Sovraccarico Ferroviario 11.45 KpA

Name: A,L1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18 kN/m³	Cohesion: 10 kPa	Phi: 22 °
Name: A,L2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 17.5 kN/m³	Cohesion: 5 kPa	Phi: 20.5 °
Name: L,A2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 27 °
Name: G,S	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °
Name: R	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 38 °
Name: SC	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 42 °
Name: SB	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 20 kN/m³	Cohesion: 600 kPa	Phi: 38 °
Name: L(S)	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 30 °
Name: Riporto	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 32 °
Name: LIQ1	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 18 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 4.3 °
Name: LIQ2	Model: Mohr-Coulomb	Unit Weight: 19 kN/m³	Cohesion: 0 kPa	Phi: 5.5 °

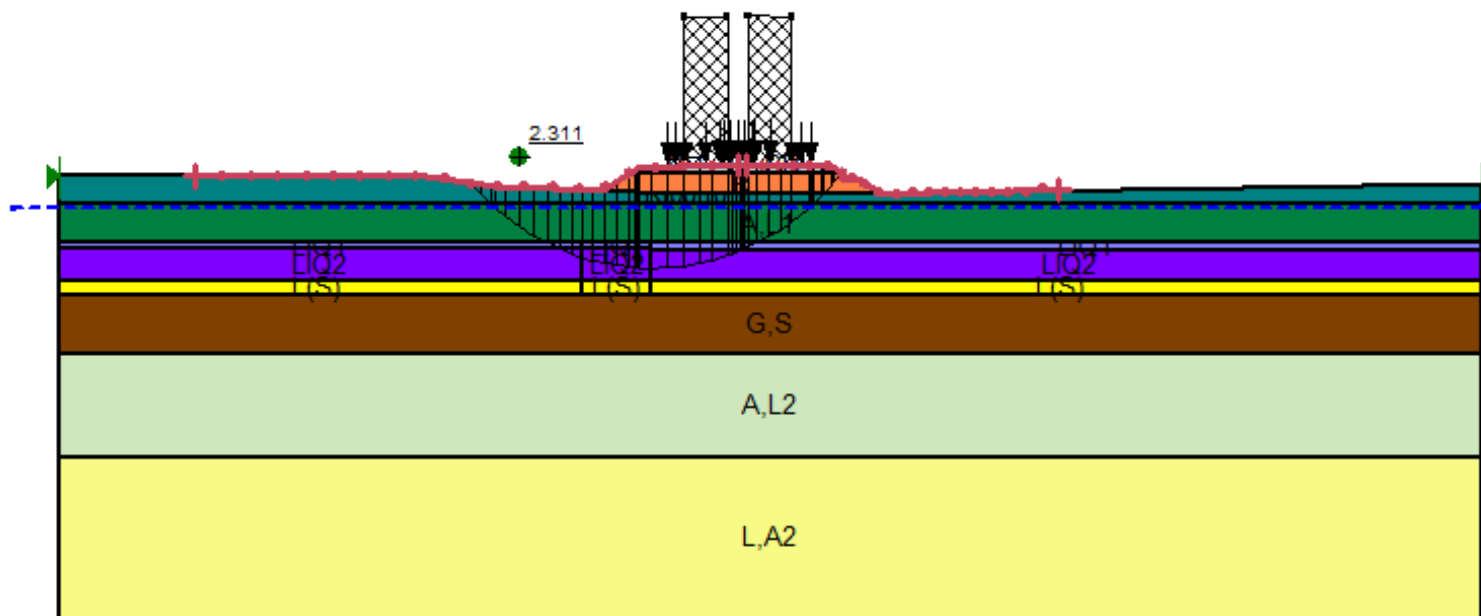


Figura 12: Rilevato H=2.70 m, sez. 2+700 - Analisi di stabilità globale in campo sismico – condizioni post-sismiche

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 55 di 188

Alla luce dei risultati ottenuti si può affermare che, sebbene vi sia presenza di materiale potenzialmente liquefacibile nel terreno di fondazione, questo non compromette le condizioni di stabilità dell'opera.

9.3 Verifiche SLE – Valutazione dei cedimenti

9.3.1 Analisi preliminari del rilevato senza interventi

9.3.1.1 Modelli e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per queste analisi è mostrato nella Figura 13 e rappresenta il rilevato di progetto alla progressiva 2+700. L'altezza del rilevato in oggetto è pari a circa 2.10 metri escluso il pacchetto di armamento ferroviario (ballast, traversine e rotaie) che ha uno spessore ulteriore di 0.65 metri (non rappresentato nel modello ma convertito in sovraccarico).

La stratigrafia di calcolo utilizzata è riportata in Tabella 12.

Si tratta di modelli bi-dimensionali in cui è mostrato il rilevato in sezione, con la propria geometria ed il sovraccarico da armamento ferroviario.

Per definire l'andamento dei cedimenti nel tempo viene omesso nell'analisi il sovraccarico da traffico ferroviario in accordo a quanto specificato in Doc. Rif. [9].

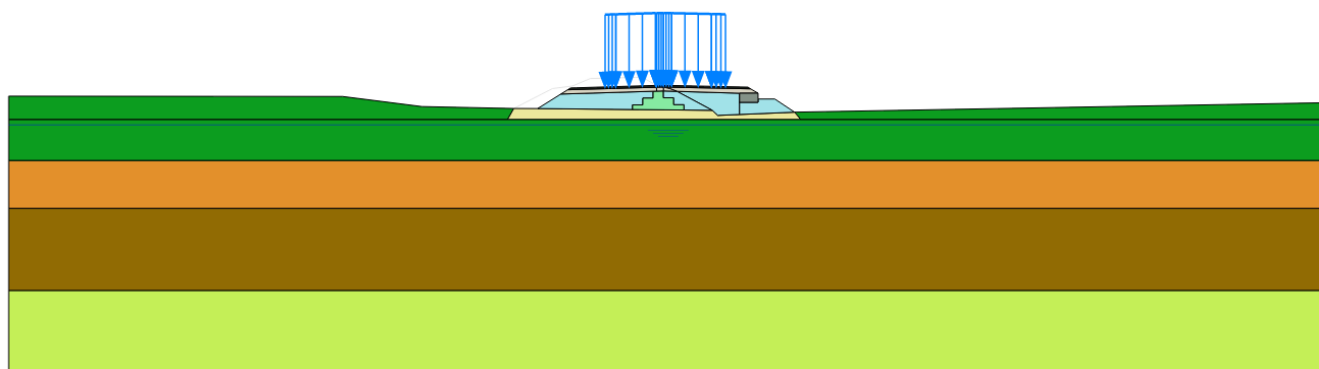


Figura 13: Modello rilevato Sez. 2+700 – senza interventi

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 56 di 188

In Figura 13 è rappresentata la configurazione finale di progetto del rilevato, sebbene per l'analisi dei cedimenti sia stata presa in considerazione anche una fase preliminare di esecuzione e consolidazione del rilevato esistente, il cui modello è illustrato in Figura 14.

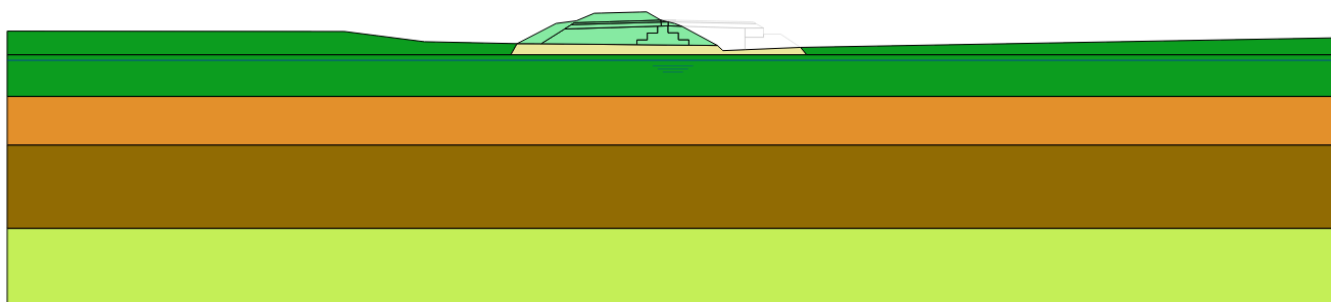


Figura 14: Modello rilevato esistente Sez. 2+700

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti (il modello di calcolo per ciascuna fase è riportato in

ALLEGATO A - RISULTATI VERIFICHE A LIQUEFAZIONE CON INTERVENTI:

- Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
- Costruzione del rilevato esistente (durata 1 anno);
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria esistente (durata 50 anni);
- Costruzione della parte destra del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 102 gg);
- Applicazione dello strato di supercompattato e sub-ballast (durata 620 gg);
- Entrata in esercizio della nuova linea (nuovo binario pari) con l'applicazione del sovraccarico da armamento ferroviario (durata 8 gg per l'applicazione);
- Demolizione della parte sinistra del rilevato esistente (durata 30 gg);
- Costruzione della parte sinistra del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 30 gg);
- Applicazione dello strato di supercompattato e sub-ballast (durata 265 gg);

- Entrata in esercizio della nuova linea (nuovo binario dispari) con l'applicazione del sovraccarico da armamento ferroviario e consolidazione del terreno di fondazione (durata totale 1 anno);
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della nuova linea ferroviaria fino a 75 anni dall'entrata in esercizio del binario sinistro.

I risultati ottenuti sono mostrati e commentati al successivo punto 9.3.1.2.

9.3.1.2 Risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i punti di interesse selezionati per il calcolo degli spostamenti verticali nelle singole fasi e per valutare l'andamento dei cedimenti nel tempo (Figura 15) e i risultati ottenuti per il rilevato in oggetto in termini di spostamenti verticali u_y al termine delle seguenti fasi:

- Al termine di tutte le fasi di costruzione della parte destra del rilevato e subito prima dell'entrata in esercizio del nuovo binario pari;
- Al termine di tutte le fasi di costruzione della parte sinistra del rilevato e subito prima dell'entrata in esercizio del nuovo binario dispari;
- Dopo 75 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.

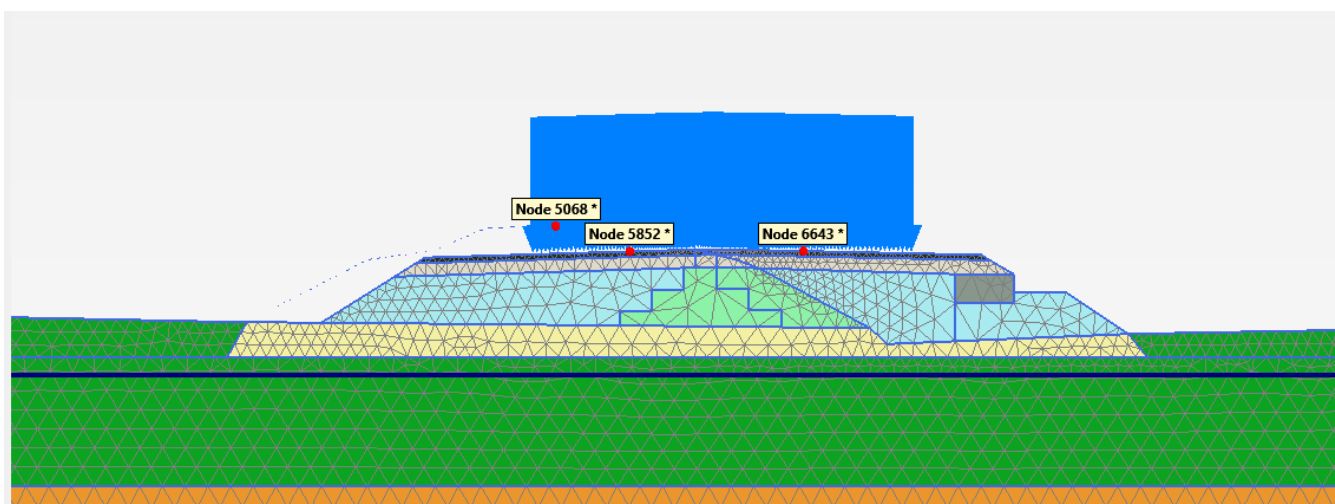


Figura 15: Rilevato sez. 2+700 senza interventi – Punti di interesse per calcolo spostamenti verticali

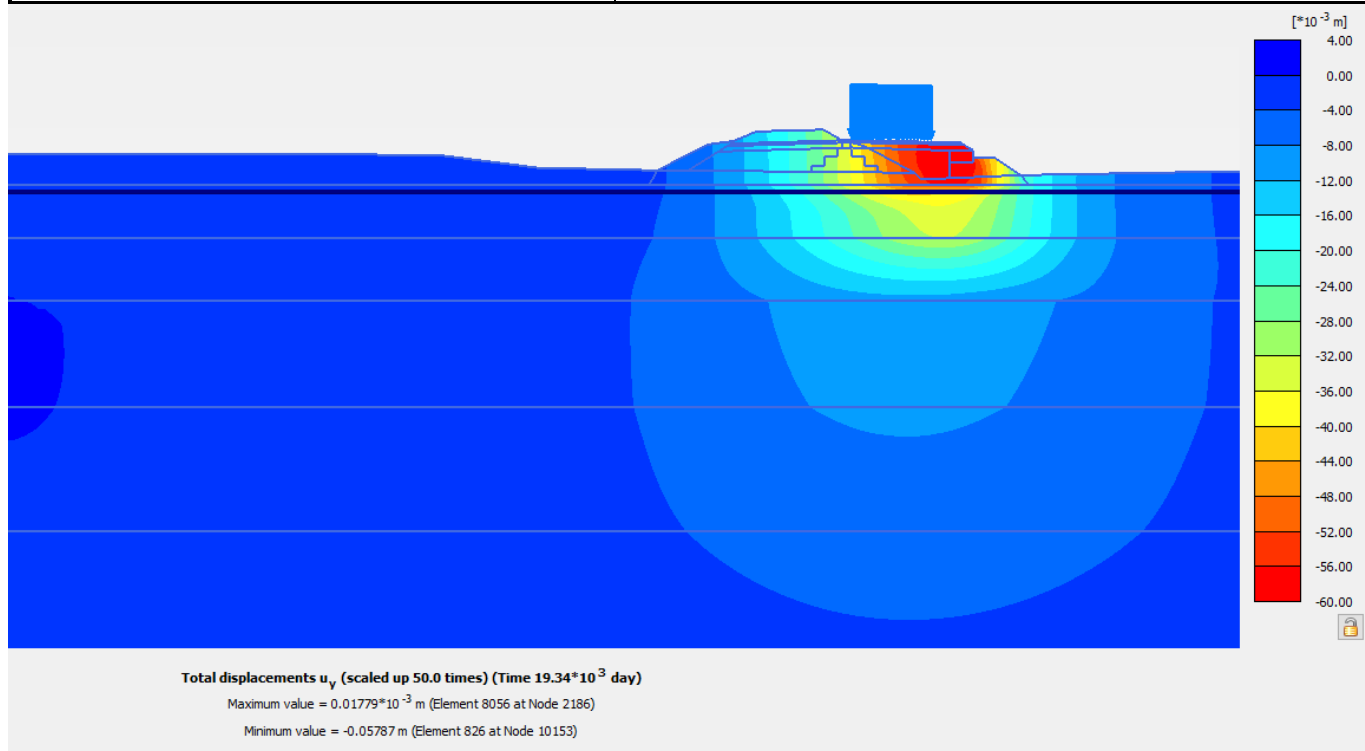


Figura 16: Rilevato sez. 2+700 senza interventi – Spostamenti verticali prima dell'attivazione de nuovo binario pari

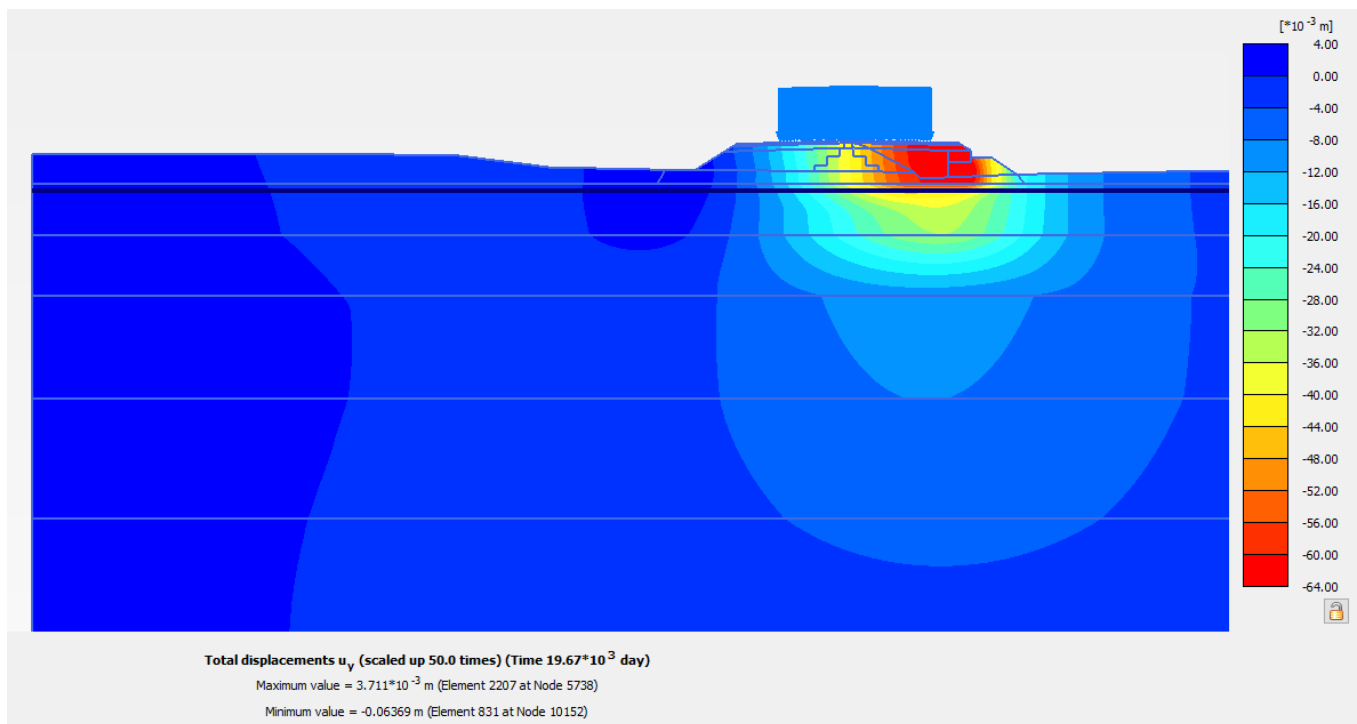


Figura 17: Rilevato sez. 2+700 senza interventi – Spostamenti verticali prima dell'attivazione del nuovo binario dispari

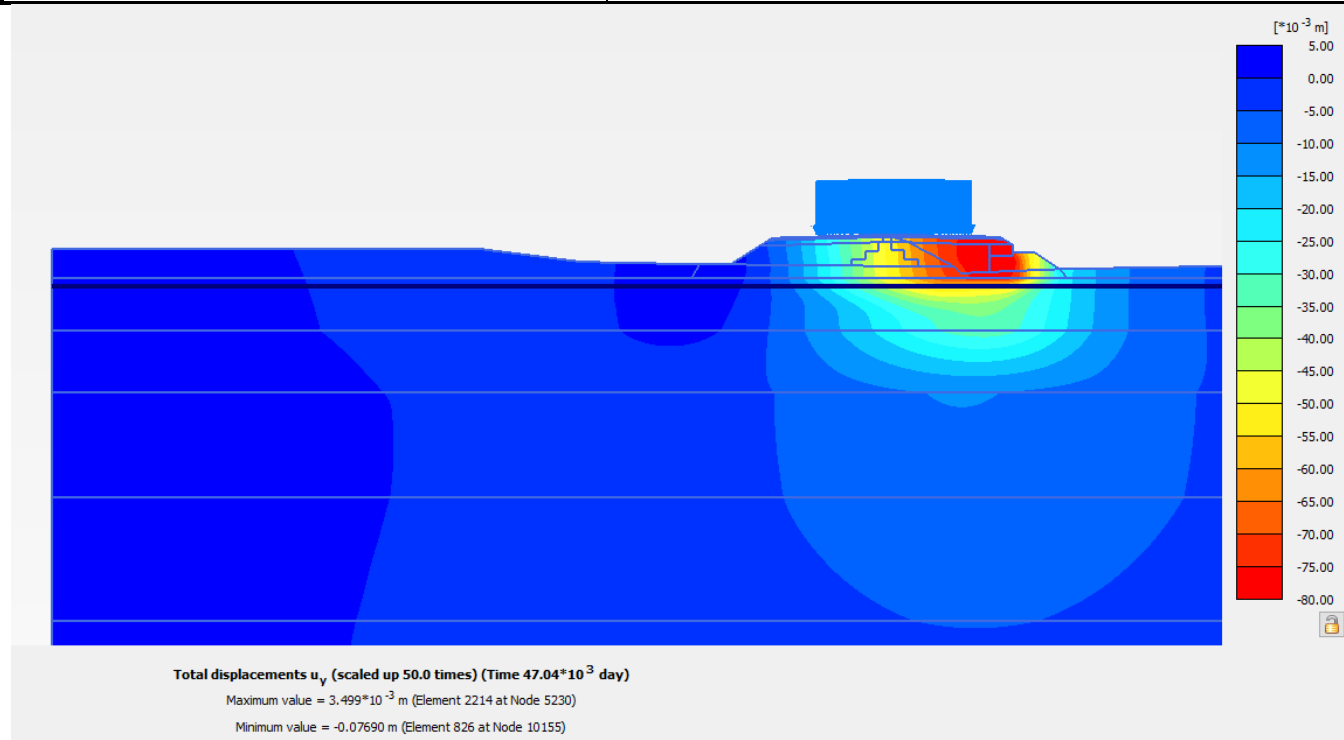


Figura 18: Rilevato sez. 2+700 senza interventi – Spostamenti verticali a 75 anni dalla messa in esercizio della linea ferroviaria

In Figura 19 e Figura 20 viene riportato l'andamento nel tempo dello spostamento verticale di due punti posizionati in sommità al rilevato in corrispondenza dell'asse del nuovo binario pari (nodo di calcolo 6643) e dell'asse del nuovo binario dispari (nodo di calcolo 5852) e di un punto in sommità al rilevato esistente in corrispondenza dell'asse binario (nodo di calcolo 5068) (si veda Figura 15).

Nella prima figura viene preso in considerazione un arco temporale superato il quale non si osserva una ulteriore evoluzione degli spostamenti verticali nel tempo, mentre nella seconda è riportato uno zoom sui primi 10 anni.

In Tabella 13 e Tabella 14 sono riportati, inoltre, i valori degli spostamenti verticali residui calcolati nei medesimi punti in corrispondenza dei diversi istanti temporali, partendo dall'entrata in esercizio del binario pari fino a 75 anni dalla messa in esercizio di tutta la linea ferroviaria.

Pescara - Chieti - LOTTO 1 - Cedimenti nel tempo sez 2+700 (H ril ≈2 m)

Sequenza costruttiva di progetto

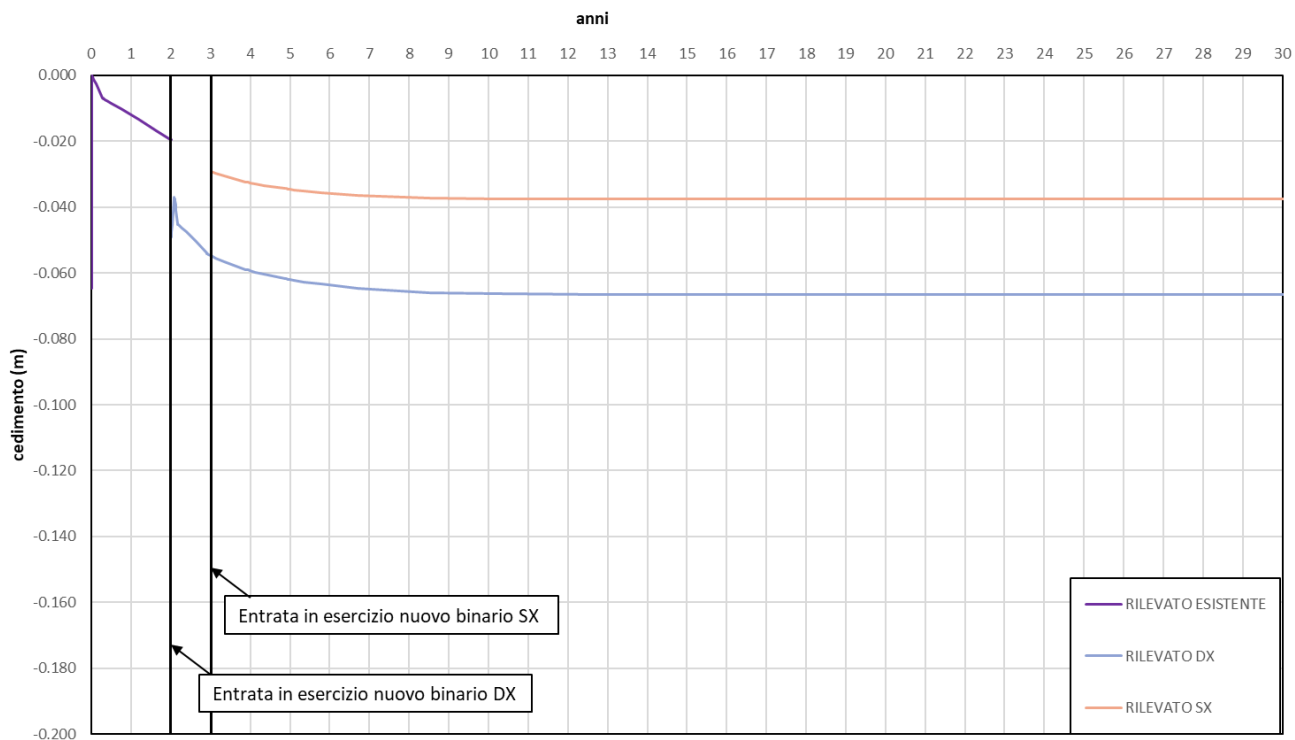


Figura 19: Rilevato sez. 2+700 senza interventi – Spostamenti verticali nel tempo in sommità al rilevato

Pescara - Chieti - LOTTO 1 - Cedimenti nel tempo sez 2+700 (H ril $\approx$ 2 m)

Sequenza costruttiva di progetto

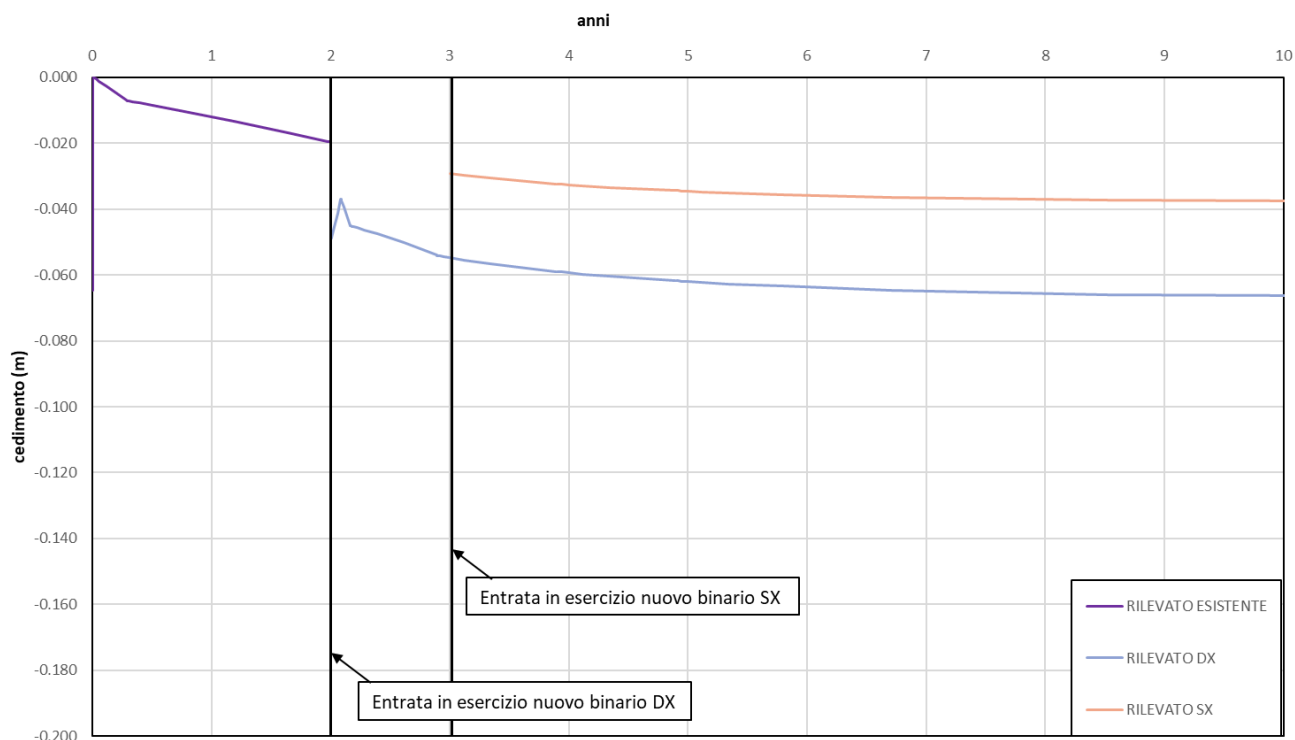


Figura 20: Rilevato 2+700 senza interventi – Spostamenti verticali nel tempo in sommità al rilevato (fino a 10 anni)

Tabella 13: Cedimenti assoluti e residui in asse a binario esistente e di progetto

Sezione	Calcolo dei cedimenti						
	Stima cedimento* a t = 2 anni	Stima cedimento* a t = 2 anni	Stima cedimento** a t = 3+75anni	Stima cedimento** a t $\geq$ 2 anni	Stima cedimento** a t = 3 anni	Stima cedimento** a t = 3+75anni	Stima cedimento** a t $\geq$ 3 anni
	assoluto [cm]	assoluto [cm]	assoluto [cm]	residuo [cm]	assoluto [cm]	assoluto [cm]	residuo [cm]
2+700	2	4.9	6.7	1.8	2.9	3.8	0.9

* in asse al binario esistente

** in asse al nuovo binario in dx

*** in asse al nuovo binario in sx

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 62 di 188

Tabella 14: Cedimenti residui in asse a binario esistente e di progetto al termine di ciascuna fase

TEMPI	FASE	Binario esistente	Binario DX	Binario SX
		Cedimento residuo		
		[cm]	[cm]	[cm]
2 anni	Attivazione binario pari	3	-	-
3 anni	Attivazione binario dispari	-	0.6	-
3+1 anni	Ced residuo a 1 anno	-	1.8	0.4
3+2 anni	Ced residuo a 2 anni	-	1.8	0.6
3+10 anni	Ced residuo a 10 anni	-	1.8	0.9
3+30 anni	Ced residuo a 30 anni	-	1.8	0.9
3+75 anni	Ced residuo a 75 anni	-	1.8	0.9

Come si può notare i valori di cedimento residuo che si ottengono sono inferiori ai 5 cm e pertanto sono compatibili con la funzionalità della linea ferroviaria e con gli interventi di manutenzione ordinaria che si prevede di realizzare durante la vita dell'opera, in accordo ai Doc. Rif. [9][11] e come specificato al precedente punto 3.2.2.

Per quanto riguarda il rilevato esistente, che le fasi costruttive prevedono rimanga attivo fino al completamento e messa in esercizio del nuovo binario pari, si calcolano valori di cedimenti attesi residui pari a circa 2 cm inferiori a quelli calcolati nella tratta precedente (da pk 0+000 a pk 1+250), ma comunque non trascurabili. A fronte di questi risultati, per questo binario specifico è stato valutato che questi spostamenti possano ritenersi accettabili, mettendo in atto opportune misure di sicurezza, quali per esempio i rallentamenti provvisori (ove necessari), e realizzando un adeguato sistema di monitoraggio degli spostamenti del binario che verrà rilevato con opportuna frequenza. Inoltre, tali valori sono considerati comunque limitati poiché gestibili come manutenzione della piattaforma ferroviaria con un minimo di ricalzo del ballast.

Tuttavia, le verifiche a liquefazione condotte per la tratta in esame restituiscono valori di cedimenti post-sisma non trascurabili, pari a 11 cm, considerando la ridotta profondità dello strato liquefacibile rispetto al piano d'appoggio del rilevato.

Per tali ragioni si rende necessaria l'esecuzione di un intervento di consolidamento mirato principalmente a mitigare il rischio di liquefazione e conseguentemente limitare gli effetti post-sisma sull'opera.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 63 di 188

Per questa sezione si prevede di realizzare quindi un intervento di trattamento con colonne di ghiaia. Il dimensionamento dell'intervento e la sua efficacia nella mitigazione del rischio liquefazione, nonché nella riduzione dei cedimenti attesi, sebbene non necessaria, sono riportati nei paragrafi seguenti.

9.3.2 Dimensionamento del trattamento con colonne di ghiaia

Come chiarito, i valori di cedimenti attesi in esercizio risultanti dalle analisi descritte nei precedenti paragrafi sono accettabili mentre la stima di un cedimento post-sisma pari a 11 cm quale effetto della liquefazione dei primi strati di terreno di fondazione comporta la necessità di dimensionare un intervento di consolidamento. Tale trattamento è mirato a irrigidire lo strato di materiale L(S) potenzialmente liquefacibile e lo strato di A,L1 sovrastante. Per questa sezione, e per tutta la tratta compresa tra la progressiva 2+650 e la progressiva 3+100, si prevede di realizzare quindi un intervento di trattamento con colonne di ghiaia. I calcoli di dimensionamento dell'intervento e la sua efficacia nella mitigazione del rischio liquefazione e nel miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei materiali vengono descritti nei paragrafi seguenti.

9.3.2.1 Analisi dimensionamento colonne di ghiaia

La procedura seguita nel dimensionamento di questo intervento è descritta al precedente punto 7.2.2. In particolare il dimensionamento viene eseguito verificando che le colonne di terreno sottoposto a trattamento dispongano di una resistenza al taglio superiore alla massima tensione tangenziale nello strato liquefacibile; in aggiunta viene ripetuta l'analisi dei cedimenti attesi in esercizio per verificare l'efficacia del trattamento anche nel contenimento dei cedimenti in esercizio.

Si procede quindi alla prima verifica per cui, al fine di eliminare il rischio di liquefazione nei primi strati del terreno di fondazione del rilevato di altezza pari a 2.70 metri, è stato ipotizzato un trattamento con colonne di ghiaia del diametro di 800 mm disposte secondo maglia quadrata di lato pari ad 2.15. Ne risulta un'area del terreno trattata pari a 4.62 m² e quindi un rapporto $r = A/A_c = 9.2$, dove A rappresenta l'area trattata e A_c l'area della singola colonna di ghiaia.

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 64 di 188

Attraverso il grafico proposto da Priebe (1998) (Figura 8) e ipotizzando di utilizzare un materiale granulare caratterizzato da un angolo di attrito interno pari a 40° , viene determinato un valore dello Stress Ratio pari a 0.7, corrispondente al suddetto rapporto A/A_c .

Moltiplicando, dunque, il valore di accelerazione massima attesa nella tratta di interesse ($a_{\max}=0.258g$) per 0.7 si ottiene un valore di accelerazione massima ridotta pari a 0.18g.

Con tale valore di accelerazione massima attesa vengono nuovamente effettuate le verifiche a liquefazione sulla base dei risultati delle prove CPT/SPT così da verificare se il trattamento ipotizzato sia sufficiente ad eliminare il rischio liquefazione.

I risultati di tale verifica sono riportati in ALLEGATO A - RISULTATI VERIFICHE A LIQUEFAZIONE CON INTERVENTI e da questi si evince che ad ogni profondità indagata il fattore di sicurezza nei confronti della liquefazione FL è sempre maggiore di 1 con valori di cedimenti attesi post-sisma inferiori a 2.5 cm, dunque il trattamento risulta **efficace per la mitigazione del rischio liquefazione.**

Successivamente si ripete l'analisi dei cedimenti attesi. A tale scopo è stato necessario definire i parametri di resistenza e di deformabilità equivalenti per il materiale trattato.

Lo strato di terreno trattato è stato modellato con un materiale equivalente avente caratteristiche meccaniche proporzionali all'entità del trattamento stesso. Nello specifico i parametri di resistenza e deformabilità del materiale trattato ($L(S)$) sono stati calcolati secondo il metodo di Priebe (1995) citato al punto 7.2 e vengono di seguito riportati:

$$\varphi'_{eq} = 35.6^\circ$$

$$c'_{eq} = 0 \text{ kPa}$$

$$E_{eq} = 8.5 \text{ Mpa}$$

Con tali parametri è stato modellato lo strato di terreno di fondazione caratterizzato dall'unità geotecnica $L(S)$, al di sotto del rilevato.

Il consolidamento del terreno di fondazione migliora le caratteristiche meccaniche dei materiali trattati apportando effetti benefici di irrigidimento.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 65 di 188

9.3.3 Analisi finali rilevato con interventi

9.3.3.1 Modello e fasi di calcolo

Il modello utilizzato per questa analisi è mostrato nella Figura 21 e considera un rilevato di altezza pari a 2.10 m (escluso l'armamento ferroviario).

Si tratta di un modello bi-dimensionale in cui è mostrato il rilevato in sezione, con la propria geometria ed i sovraccarichi rappresentativi dell'armamento ferroviario, oltre alla presenza degli interventi colonnari di consolidamento che ai fini del calcolo sono disposti solo al di sotto delle due scarpate destra e sinistra del rilevato sebbene questa rappresenti solo la condizione minima per garantire la riduzione dei cedimenti attesi, infatti nella configurazione finale di progetto è prevista l'estensione del trattamento al di sotto di tutta l'area di impronta del rilevato.

Anche per questo tipo di analisi vengono omessi nel calcolo i sovraccarichi da traffico ferroviario come chiarito dal Doc. Rif. [9].

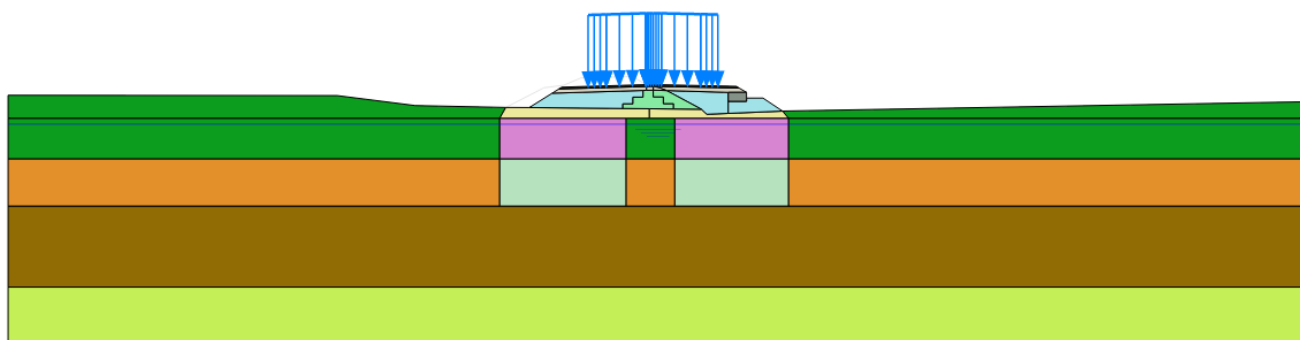


Figura 21:Modello rilevato Sez. 2+700 – con interventi

Per l'analisi dei cedimenti è stata presa in considerazione anche una fase preliminare di esecuzione e consolidazione del rilevato esistente, il cui modello è il medesimo utilizzato nelle analisi dei cedimenti del rilevato senza interventi, descritte nei paragrafi precedenti (Figura 14)

Le fasi di calcolo simulate sono le seguenti (il modello di calcolo per ciascuna fase è riportato in Allegato C - Risultati analisi Plaxis ril. 2+700 con interventi

- Generazione dello stato tensionale iniziale con piano campagna attuale;
- Costruzione del rilevato esistente (durata 1 anno);

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 66 di 188

- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della linea ferroviaria esistente (durata 50 anni);
- Esecuzione della prima parte di trattamento e costruzione della parte destra del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 102 gg);
- Applicazione dello strato di supercompattato e sub-ballast con l'applicazione del sovraccarico da armamento ferroviario (durata 620 gg);
- Entrata in esercizio della nuova linea (nuovo binario pari) (durata 8 gg per l'applicazione);
- Demolizione della parte sinistra del rilevato esistente (durata 30 gg);
- Esecuzione della prima parte di trattamento e costruzione della parte sinistra del rilevato sino all'altezza di progetto (durata 30 gg);
- Applicazione dello strato di supercompattato e sub-ballast con l'applicazione del sovraccarico da armamento ferroviario (durata 265 gg);
- Entrata in esercizio della nuova linea (nuovo binario dispari) e consolidazione del terreno di fondazione (durata totale 1 anno);
- Consolidazione del terreno di fondazione nel corso dell'esercizio della nuova linea ferroviaria fino a 75 anni dall'entrata in esercizio del binario sinistro.

9.3.3.2 Risultati

Nelle figure seguenti sono riportati i punti di interesse selezionati per il calcolo degli spostamenti verticali nelle singole fasi e per valutare l'andamento dei cedimenti nel tempo (Figura 22) e i risultati ottenuti per il rilevato in oggetto in presenza di trattamenti in Deep Mixing in termini di spostamenti verticali u_y al termine delle seguenti fasi:

- Al termine di tutte le fasi di costruzione della parte destra del rilevato e subito prima dall'entrata in esercizio del nuovo binario pari;
- Al termine di tutte le fasi di costruzione della parte sinistra del rilevato e subito prima dall'entrata in esercizio del nuovo binario dispari;
- Dopo 75 anni dall'entrata in esercizio della linea ferroviaria.

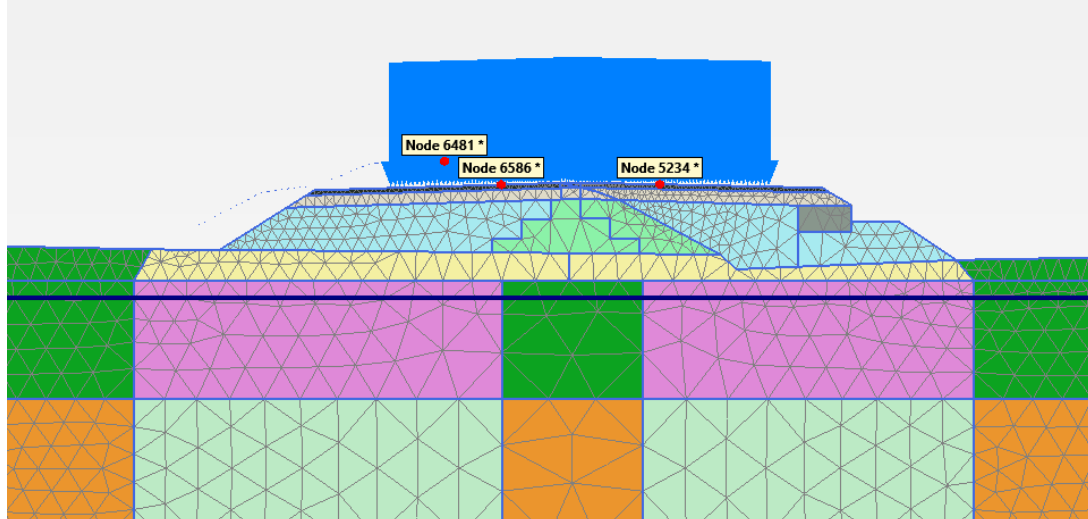


Figura 22: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Punti di interesse per calcolo spostamenti verticali

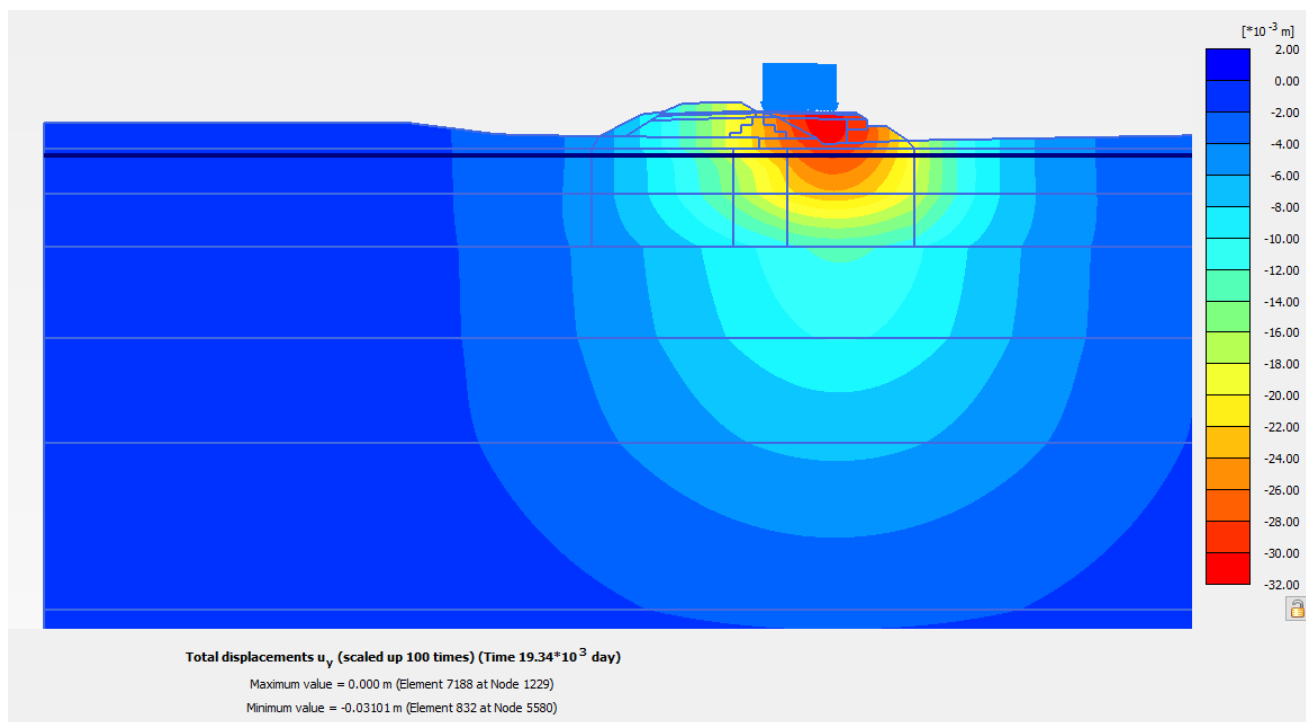


Figura 23: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Spostamenti verticali prima della messa in esercizio del nuovo binario pari

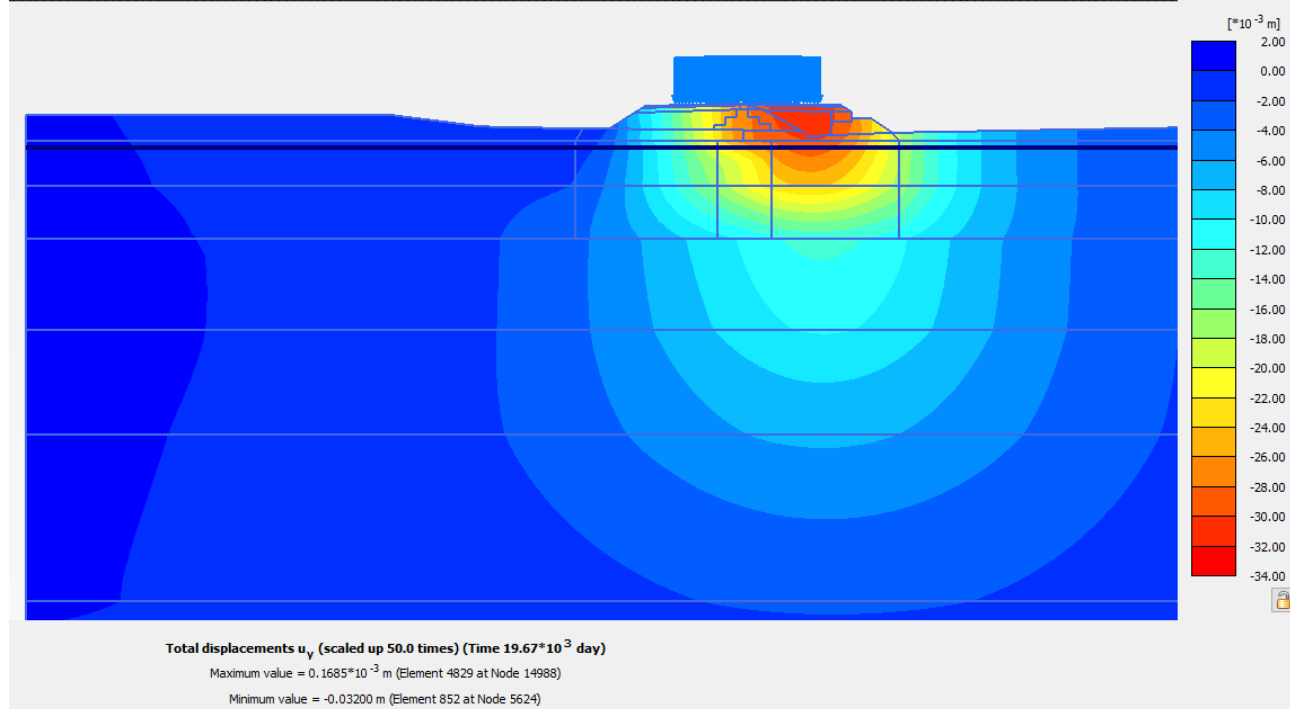


Figura 24: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Spostamenti verticali prima della messa in esercizio del nuovo binario dispari

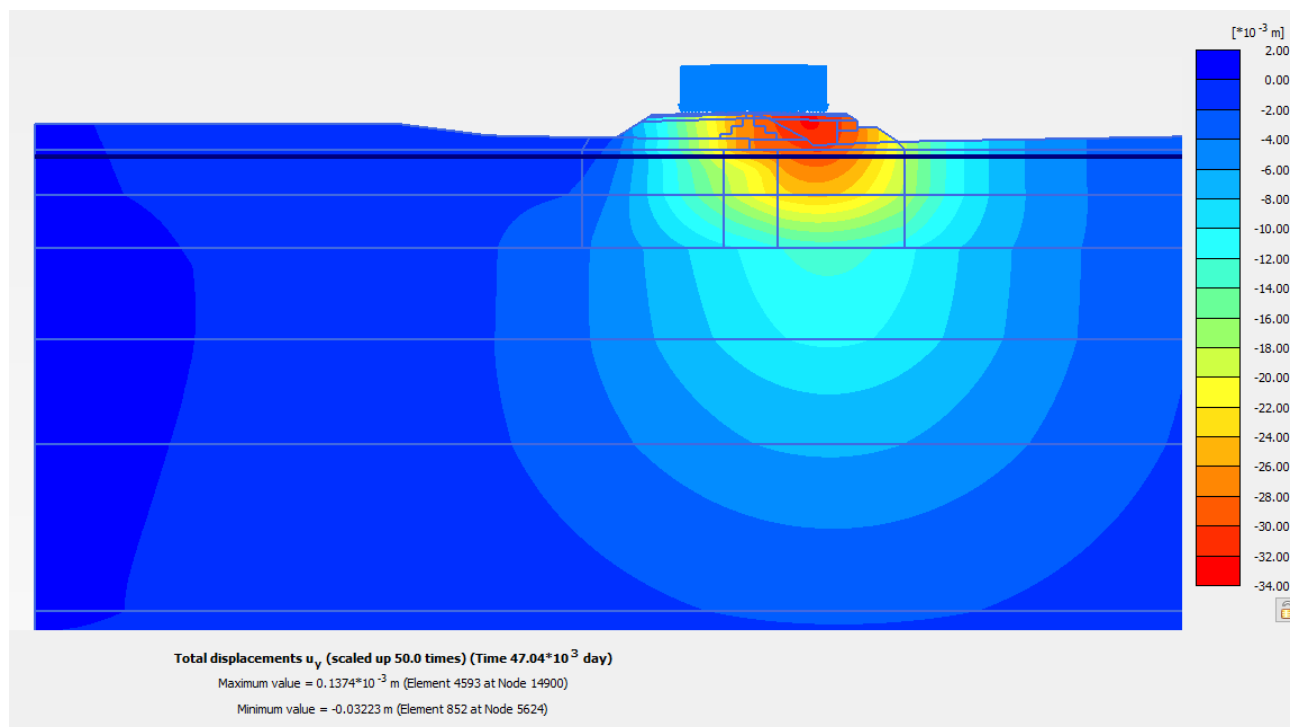


Figura 25: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Spostamenti verticali a 75 anni dalla messa in esercizio della linea ferroviaria

In Figura 26 e Figura 27 viene riportato l'andamento nel tempo dello spostamento verticale di due punti posizionati in sommità al rilevato in corrispondenza dell'asse binario destro (nodo di calcolo 5234) e dell'asse binario sinistro (nodo di calcolo 6586) e di un punto in sommità al rilevato esistente in corrispondenza dell'asse binario (nodo di calcolo 6481), in presenza dei trattamenti colonnari e confrontato con l'andamento degli spostamenti verticali in assenza di trattamento.

Nella prima figura viene preso in considerazione un arco temporale superato il quale non si osserva una ulteriore evoluzione degli spostamenti verticali nel tempo, mentre nella seconda è riportato uno zoom sui primi 10 anni.

In Tabella 15 e Tabella 16 sono riportati, inoltre, i valori degli spostamenti verticali residui calcolati nei medesimi punti in corrispondenza dei diversi istanti temporali, partendo dall'entrata in esercizio del binario pari fino a 75 anni dalla messa in esercizio di tutta la linea ferroviaria.

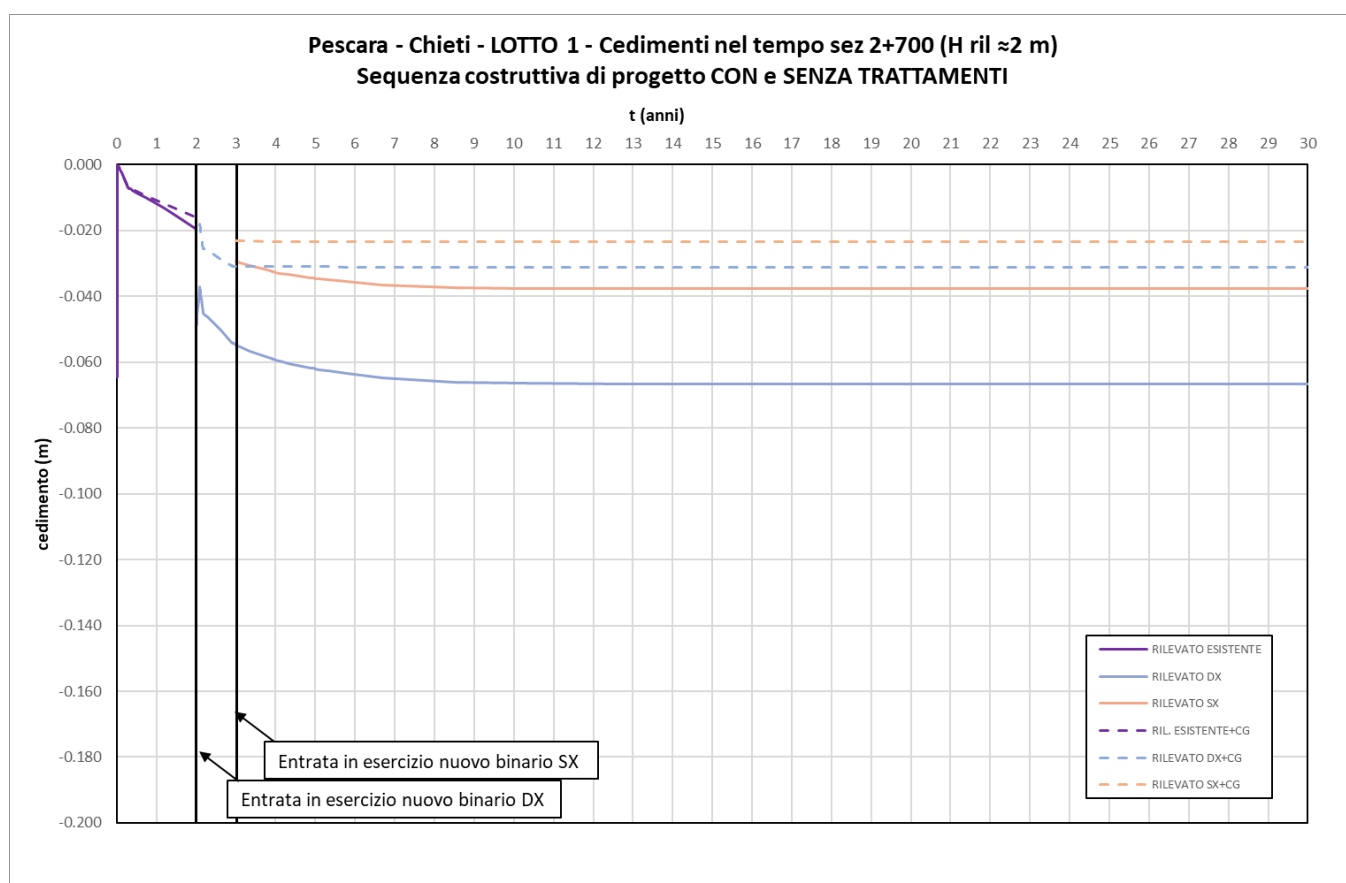


Figura 26: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Spostamenti verticali nel tempo in sommità al rilevato

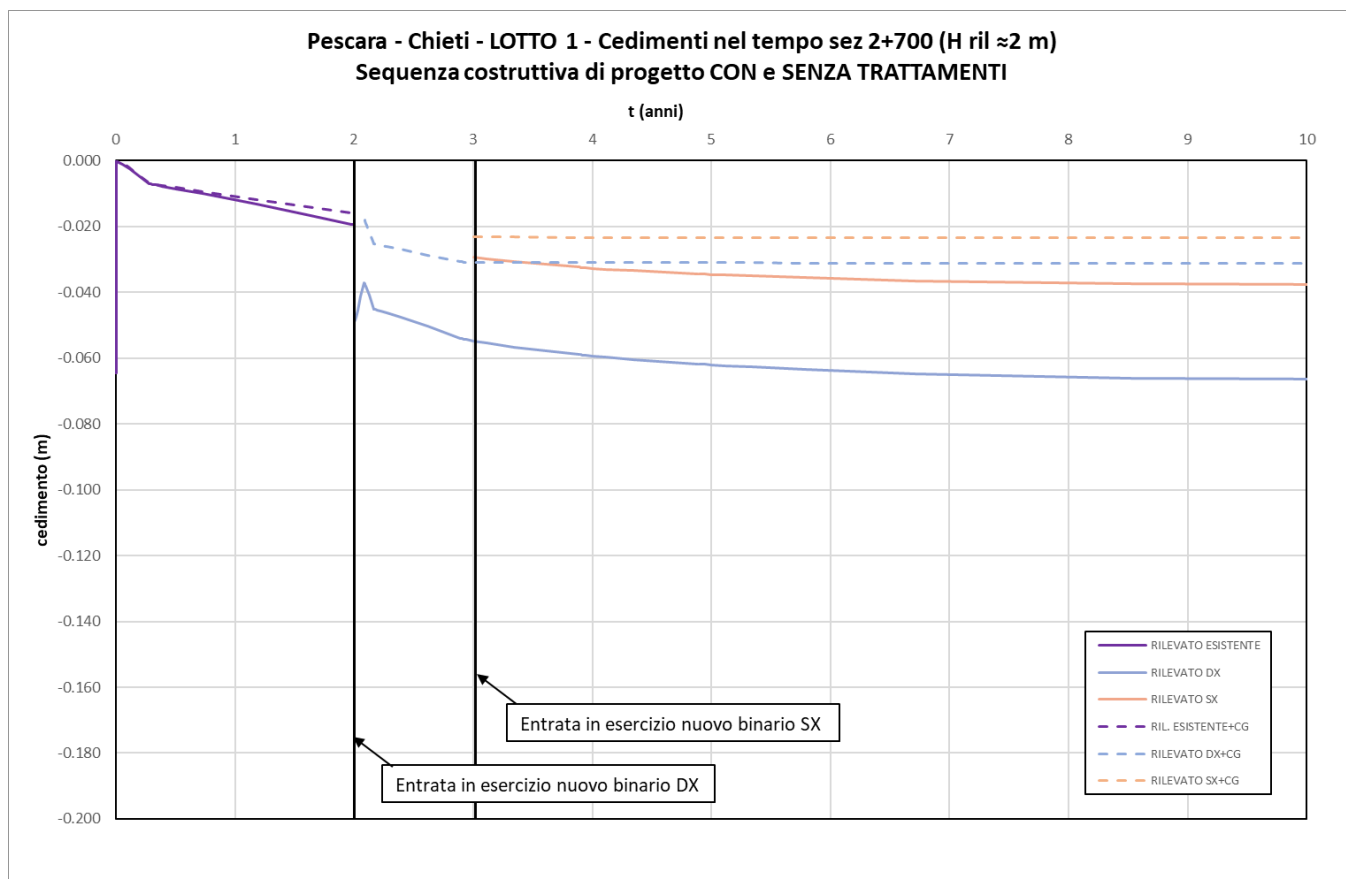


Figura 27: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Spostamenti verticali nel tempo in sommità al rilevato (fino a 10 anni)

Tabella 15: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Cedimenti assoluti e residui in asse a binario esistente e di progetto

Sezione	Calcolo dei cedimenti						
	Stima cedimento* a t = 2 anni	Stima cedimento** a t = 2 anni	Stima cedimento** a t = 3+75anni	Stima cedimento** a t >= 2 anni	Stima cedimento*** a t = 3 anni	Stima cedimento*** a t = 3+75anni	Stima cedimento*** a t >= 3 anni
	assoluto	assoluto	assoluto	residuo	assoluto	assoluto	residuo
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
2+700 (CG)	1.6	1.6	3.1	1.5	2.3	2.3	0

* in asse al binario esistente

** in asse al nuovo binario in dx

*** in asse al nuovo binario in sx

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 71 di 188

Tabella 16: Rilevato Sez. 2+700 con interventi – Cedimenti residui in asse a binario esistente e di progetto al termine di ciascuna fase

TEMPI	FASE	Binario esistente	Binario DX	Binario SX
		Cedimento residuo		
		[cm]	[cm]	[cm]
2 anni	Attivazione binario pari	1.6	-	-
3 anni	Attivazione binario dispari	-	1.5	-
3+1 anni	Ced residuo a 1 anno	-	1.5	0
3+2 anni	Ced residuo a 2 anni	-	1.5	0
3+10 anni	Ced residuo a 10 anni	-	1.5	0
3+30 anni	Ced residuo a 30 anni	-	1.5	0
3+75 anni	Ced residuo a 75 anni	-	1.5	0

In accordo a quanto riportato nei Doc. Rif [9][11] e richiamato al punto 7 i cedimenti residui attesi dal completamento e dall'attivazione della nuova linea ferroviaria risultano inferiori ai limiti imposti, confermando l'efficacia dell'intervento di consolidamento nel terreno di fondazione.

Si ricorda, invece, che per quanto riguarda il rilevato esistente si calcolano valori di cedimenti attesi pari a circa 1.6 cm. A fronte di questi risultati, per questo binario specifico, che deve rimanere attivo fino al completamento e messa in esercizio del nuovo binario pari, è stato valutato che questi spostamenti possano ritenersi accettabili, mettendo in atto opportune misure di sicurezza, quali per esempio rallentamenti provvisori (ove necessari), e realizzando un adeguato sistema di monitoraggio degli spostamenti del binario che verrà rilevato con opportuna frequenza. Inoltre, tali valori sono considerati comunque limitati poiché gestibili come manutenzione della piattaforma ferroviaria con un minimo di rinalzo del ballast.

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 72 di 188

10. FERMATA AEROPORTO (TRATTA pk 2+710÷2+960)

nella tratta compresa tra la progressiva 2+710 e la progressiva 2+960, corrispondente alla fermata aeroporto, compresa l'area di pertinenza del fabbricato FV02, la presenza dei pali di fondazione dei muri di sostegno rende difficile l'esecuzione di un trattamento di consolidamento con Colonne di Ghiaia, perciò solo in corrispondenza della suddetta tratta si prevede di realizzare un trattamento in Deep Mixing mirato ad irrigidire gli strati di terreno liquefacibile.

I calcoli di dimensionamento dell'intervento e la sua efficacia nella mitigazione del rischio liquefazione e nel miglioramento delle caratteristiche meccaniche dei materiali vengono al punto successivo.

10.1 Analisi dimensionamento colonne in Deep Mixing (DCM)

La procedura seguita nel dimensionamento di questo intervento è descritta al precedente punto 7.1.2. In particolare il dimensionamento viene eseguito verificando che le colonne di terreno sottoposto a trattamento dispongano di una resistenza al taglio superiore alla massima tensione tangenziale nello strato liquefacibile.

Pertanto, al fine di eliminare il rischio di liquefazione nei primi strati del terreno di fondazione del rilevato le colonne di terreno sottoposto a trattamento devono disporre di una resistenza al taglio tale da soddisfare la relazione:

$$\frac{R_{tr,d}}{E_{d,max}} = \frac{\tau_{tr} A}{\tau_{max} A} = FS \geq 1.25$$

Nel caso in esame la tensione tangenziale di picco massima alla profondità media dello strato liquefacibile risulta pari a:

$$\tau_{max} = 33.87 \text{ kPa.}$$

Tale valore è ottenuto considerando per una magnitudo M pari a 6.0 un coefficiente C_m pari a 1.32.

Nell'ipotesi di trattare il terreno con un dosaggio di cemento predefinito pari a 150 kg/m³, in accordo alle correlazioni suggerite da Taki et al. (1991) riportate nel par. 7.1.2, si valuta la

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 73 di 188

resistenza a compressione non confinata delle colonne $q_u = 12.50 \text{ kg/cm}^2$ e in accordo a Saitoh et al. (1980) come descritto nel par. 7.1.2 la corrispondente resistenza al taglio $\tau_{tr} = 322 \text{ kPa}$.

Con un'area trattata pari al 20% dell'area totale, corrispondente cioè ad un trattamento di colonne in Deep Mixing del diametro di 600 mm disposte secondo celle quadrate di lato pari a 4.2 metri, il FS risulta pari a 1.8, dunque il trattamento risulta **efficace per la mitigazione del rischio liquefazione.**

Il consolidamento del terreno di fondazione migliora le caratteristiche meccaniche dei materiali trattati apportando effetti benefici di irrigidimento.

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 74 di 188

11. CONSIDERAZIONI FINALI SUI RILEVATI DA 1+250 A 4+500

Relativamente alla tratta ferroviaria tra la progressiva 1+250 e 4+500 sono state svolte una serie di verifiche basate sulle seguenti considerazioni:

- La sede ferroviaria nella tratta in esame si sviluppa in rilevato lungo quasi tutto il tracciato, raggiungendo altezze massime di progetto pari a circa 3 m e per un tratto compreso tra il km 1+550 e il km 2+000 è a raso con il piano campagna. La nuova sede ferroviaria a doppio binario viene realizzata interamente in affiancamento alla sede della linea esistente che ha altezze paragonabili a quelle di progetto.
- Si è deciso di effettuare le verifiche di compatibilità dei cedimenti con la funzionalità dell'opera durante la vita utile e le verifiche di stabilità del sistema su un'unica sezione ritenuta significativa al km 2+700. Le ragioni di tale scelta sono le seguenti:
 - il rilevato è caratterizzato da un'altezza di progetto tra le massime raggiunte lungo l'intera tratta e proporzionalmente massimi valori dei cedimenti attesi in esercizio;
 - il terreno di fondazione è costituito da materiale potenzialmente liquefacibile tale da compromettere le condizioni di stabilità del rilevato.

Dai risultati ottenuti si evince che l'esecuzione degli interventi di consolidamento del terreno di fondazione sia necessaria per la sola esigenza di mitigare il rischio di liquefazione e ridurre i possibili effetti post-sisma stimati che potrebbero compromettere la funzionalità dell'opera.

Pertanto nella tratta compresa tra il km 1+250 e 2+650 non sono previsti trattamenti di consolidamento vista la modesta altezza dei rilevati e l'assenza di zone a rischio liquefazione con l'eccezione della tratta tra la progressiva 1+480 e la progressiva 1+900 che tuttavia presenta il terreno potenzialmente liquefacibile ad una profondità tale da non indurre conseguenze della liquefazione sull'opera.

Tra la 2+650 e la 2+710 e tra la 2+960 e la 3+100 il terreno viene trattato con colonne di ghiaia di diametro 800 mm, disposte secondo maglia quadrata di lato pari ad 2.15 m, con una lunghezza delle colonne pari a circa 7 m (tale lunghezza è definita in funzione delle fasi costruttive della tratta). L'effetto del trattamento colonnare modifica le caratteristiche di resistenza al taglio del

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 75 di 188

materiale potenzialmente liquefacibile, irrigidendolo e abbassando di conseguenza i valori dei cedimenti attesi post-costruzione.

Tra la 2+710 e la 2+960 (Fermata Aeroporto) il terreno viene trattato con colonne in Deep Mixing di diametro 600 mm, secondo una struttura a celle quadrate di lato 4.2 m, con una lunghezza delle colonne tra 5 e 8 m (tale lunghezza è definita in funzione delle fasi costruttive della tratta). L'effetto del trattamento colonnare modifica le caratteristiche di resistenza al taglio del materiale potenzialmente liquefacibile, irrigidendolo.

Dal km 3+100 al km 4+500 non sono previsti ulteriori interventi di consolidamento del terreno di fondazione del rilevato.

I cedimenti residui attesi sul rilevato esistente, durante le fasi di costruzione del nuovo binario pari, sono ritenuti accettabili considerando di mettere in atto opportune misure di sicurezza, quali per esempio i rallentamenti, e di realizzare un adeguato sistema di monitoraggio degli spostamenti del binario che verrà rilevato con opportuna frequenza.

Ovviamente gli interventi di consolidamento proposti sono stati valutati in modo da omogeneizzare il comportamento del rilevato e pertanto verrà realizzata una fascia di transizione tra le zone con trattamento e quelle limitrofe senza trattamento. La sintesi degli interventi che si prevede di realizzare è di seguito riportata e riassunta in Tabella 17.

Tabella 17: Sintesi caratteristiche trattamenti.

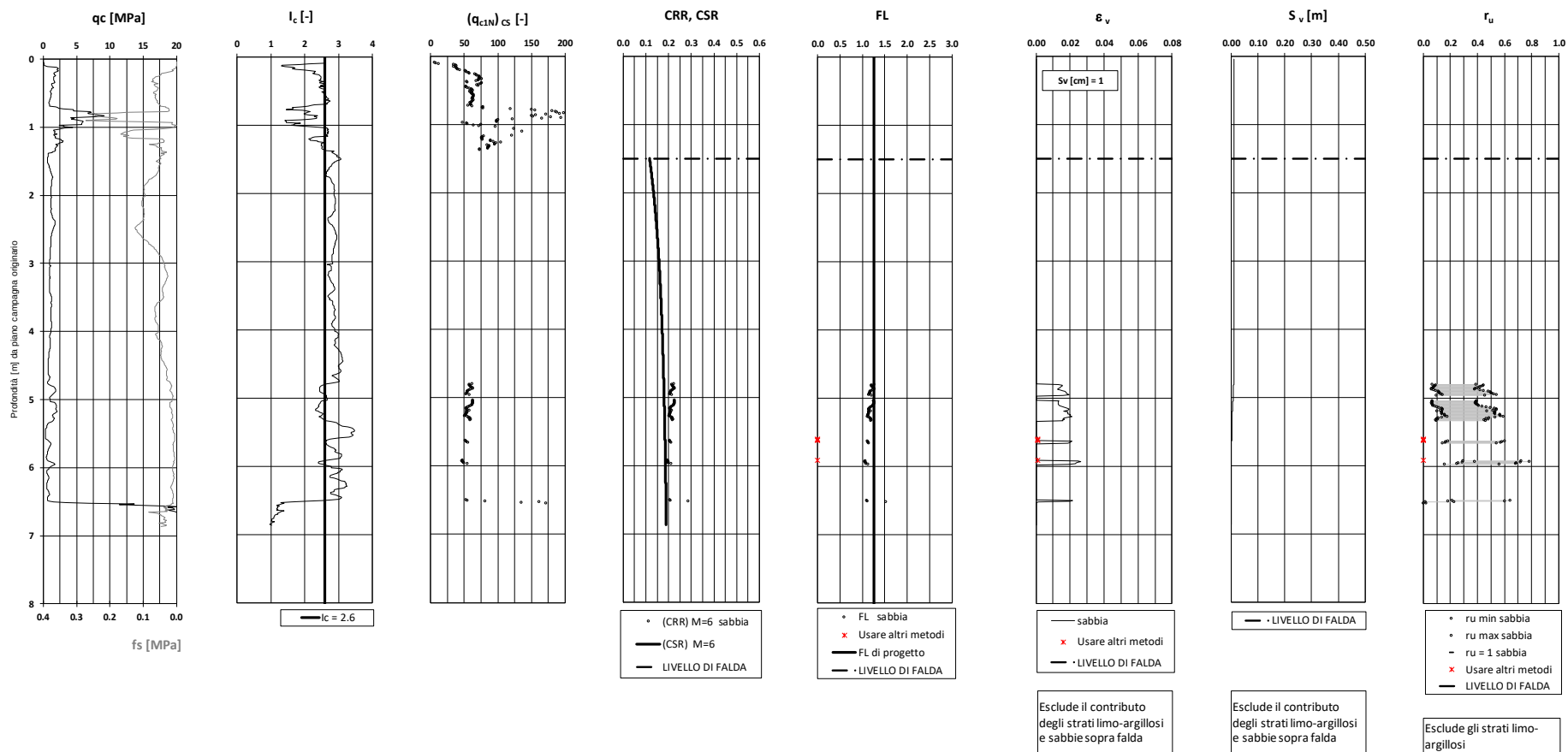
Tratto		L tratto	Trattamento	Cemento	Maglia	D Colonne	L Colonne	A _{DM} /A	φ _{eq}	c _{eq}	E _{eq}
				[kg/m ³]	Lato in [m]	[mm]	[m]	[-]	[°]	[kPa]	[MPa]
2+650	2+710	60	CG	-	quadrata L=2.15	800	7	11%	35.6	0	8.5
2+710	2+960	250	DM	150	Setti L=4.2	600	7	20%	30	25	35
2+960	3100	140	CG	-	quadrata L=2.15	800	7	11%	35.6	0	8.5

ALLEGATO A - RISULTATI VERIFICHE A LIQUEFAZIONE CON INTERVENTI

Pescara - Velocizzazione della linea Roma-Pescara – Raddoppio ferroviario tratta Pescara Porta Nuova – Chieti (Lotto 1) - Prova CPTU-2

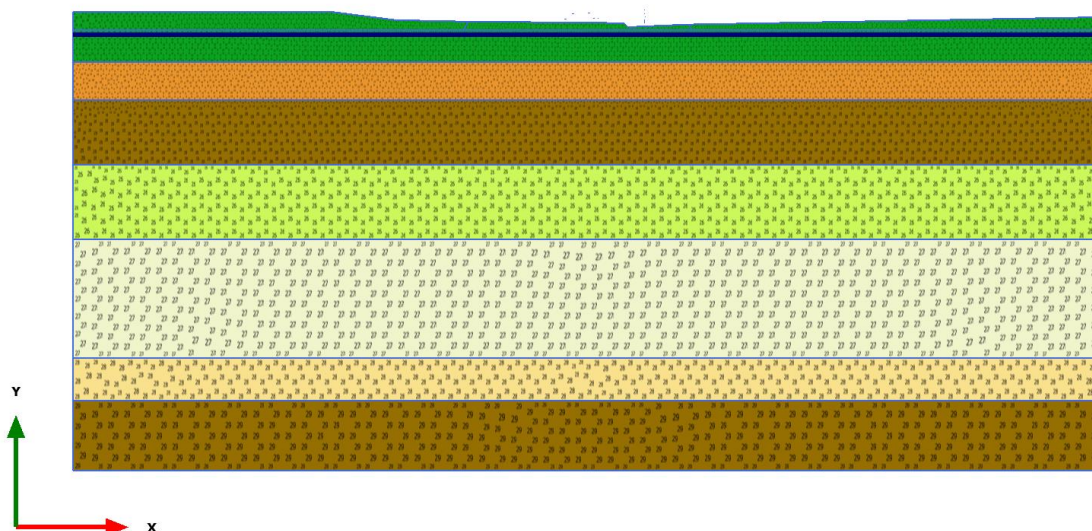
$A_{max_calc} / g = 0.18$ $M_{calc} = 6$ Approccio NCEER 1996 - 1998 - 2001 $MSF = 2,2$

Sezione 2+700



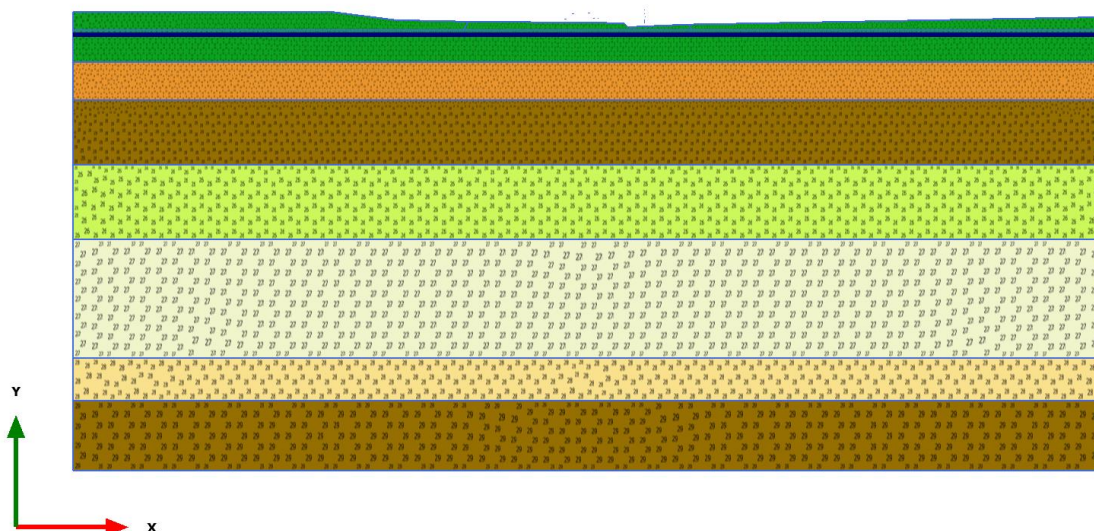
ALLEGATO B - RISULTATI ANALISI PLAXIS RIL. 2+700 SENZA INTERVENTI

1.1.1.1 Calculation results, Initial phase [InitialPhase] (0/0), Connectivity plot



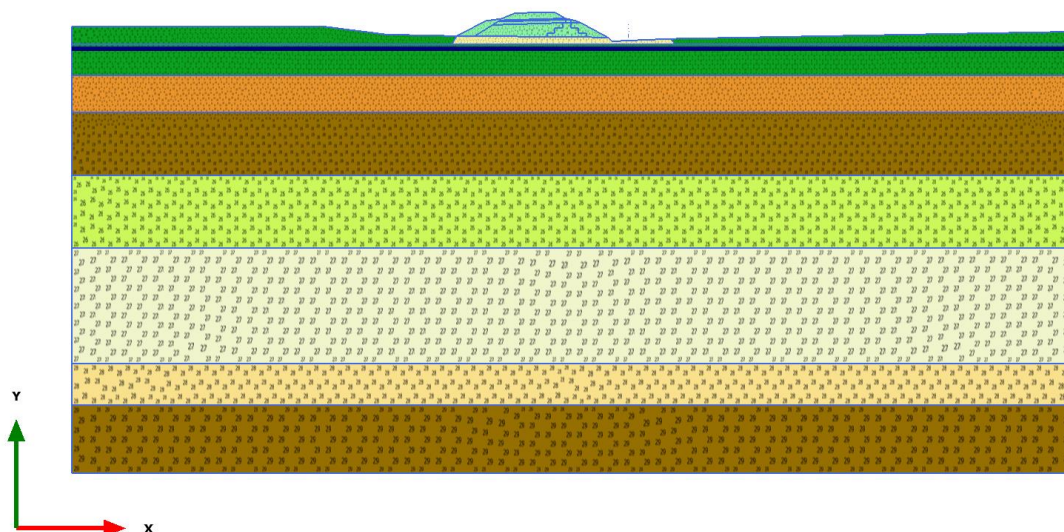
Connectivity plot

1.1.1.2 Calculation results, Cond. iniziale [Phase_1] (1/3), Connectivity plot



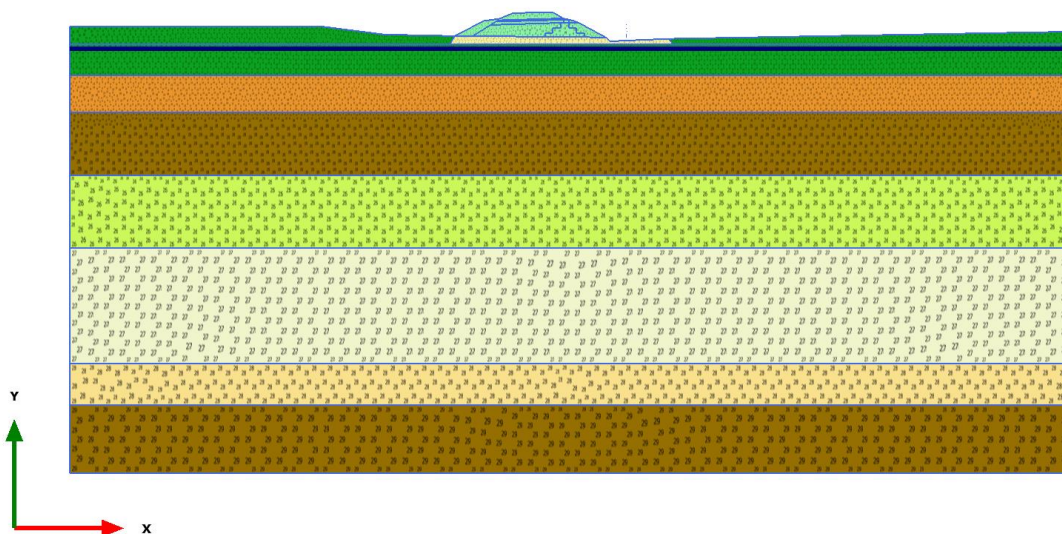
Connectivity plot

1.1.1.3 Calculation results, costr. ril. esistente [Phase_2] (2/12), Connectivity plot



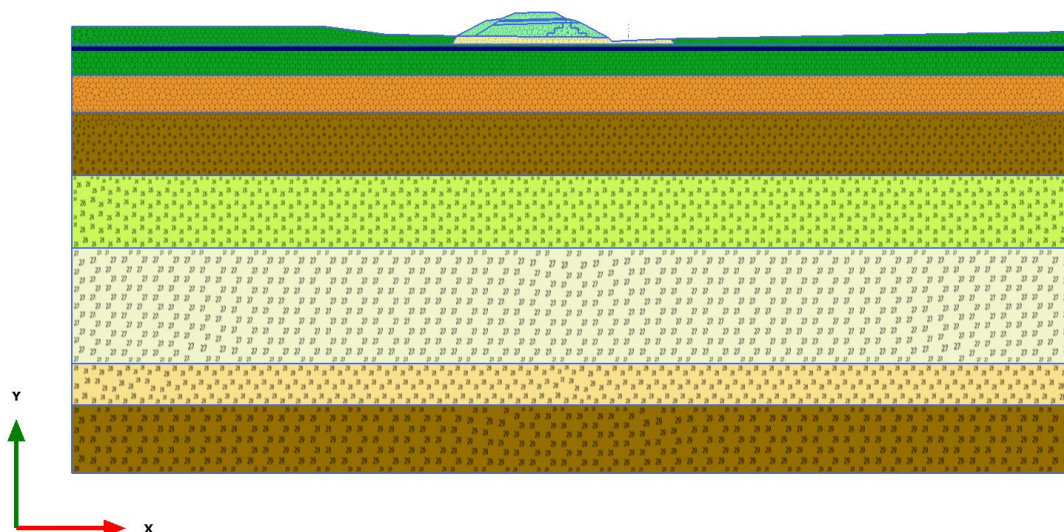
Connectivity plot

1.1.1.4 Calculation results, Esercizio rilevato esistente [Phase_4] (4/14), Connectivity plot



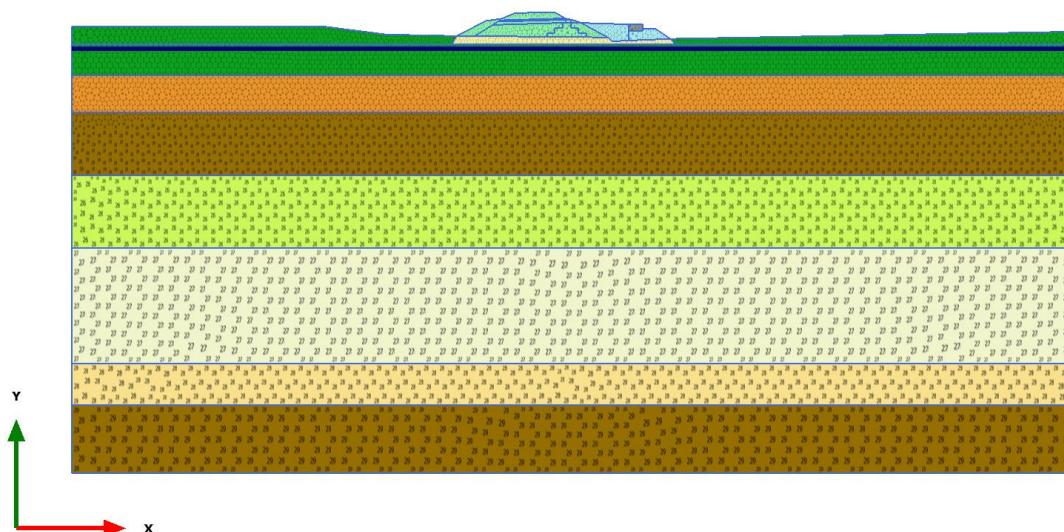
Connectivity plot

1.1.1.5 Calculation results, consolidaz. ril. esistente [Phase_3] (3/38), Connectivity plot



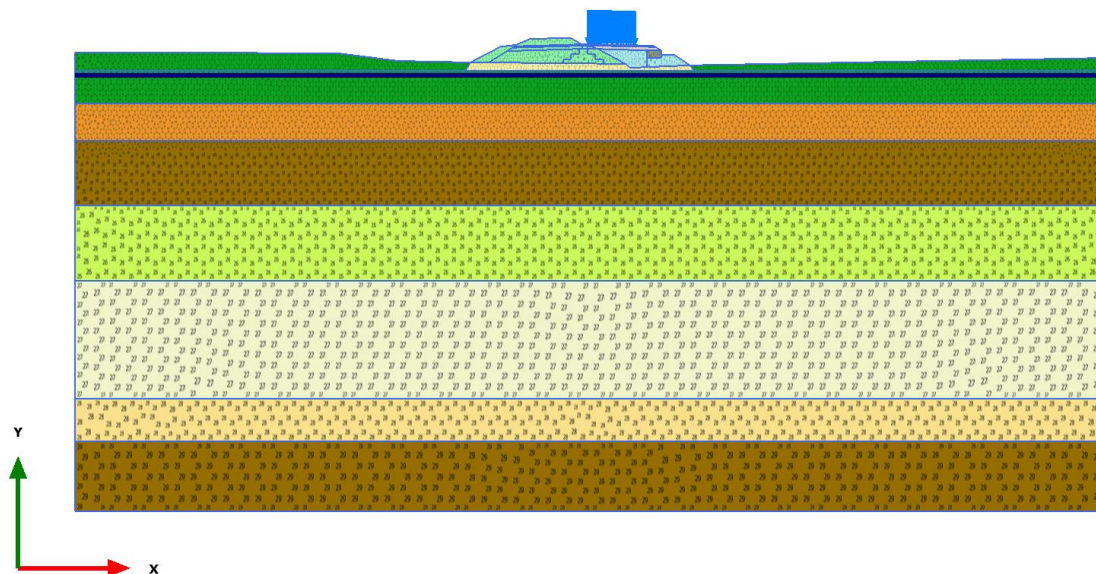
Connectivity plot

1.1.1.6 Calculation results, costruz. rilevato dx [Phase_7] (7/45), Connectivity plot



Connectivity plot

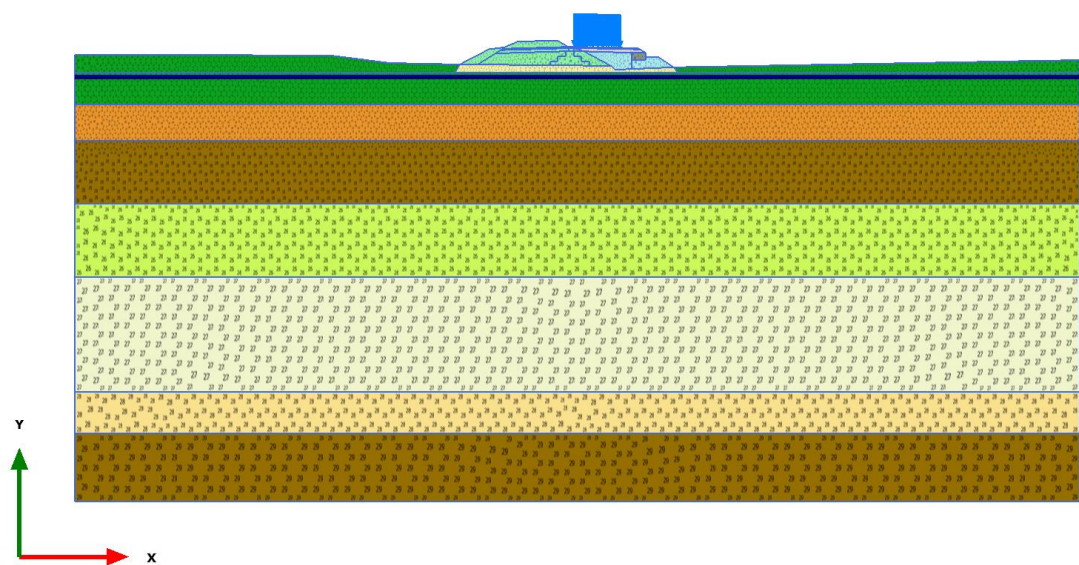
1.1.1.7 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/56), Connectivity plot



Connectivity plot

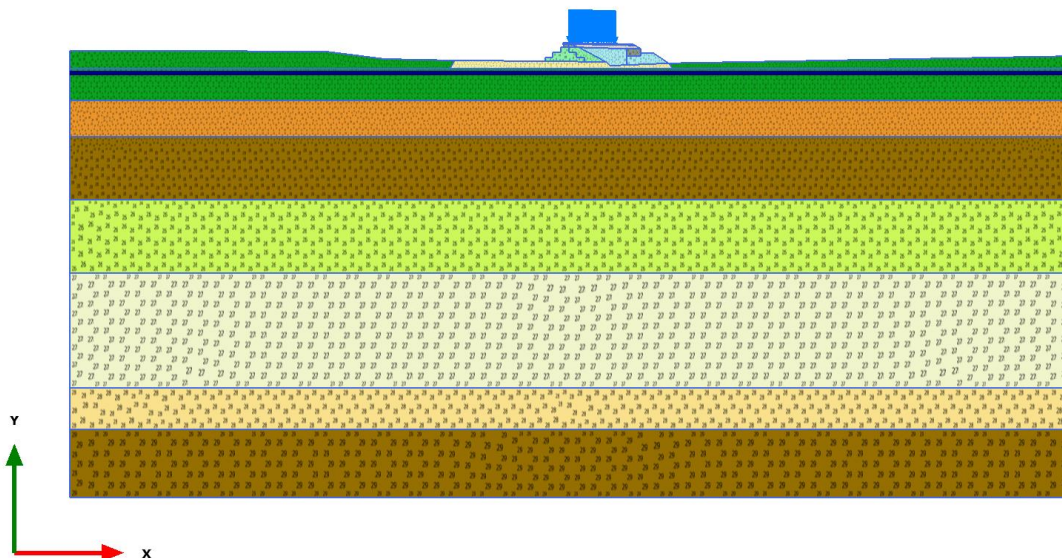
 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 86 di 188

1.1.1.8 Calculation results, esercizio nuova linea [Phase_14] (14/60), Connectivity plot



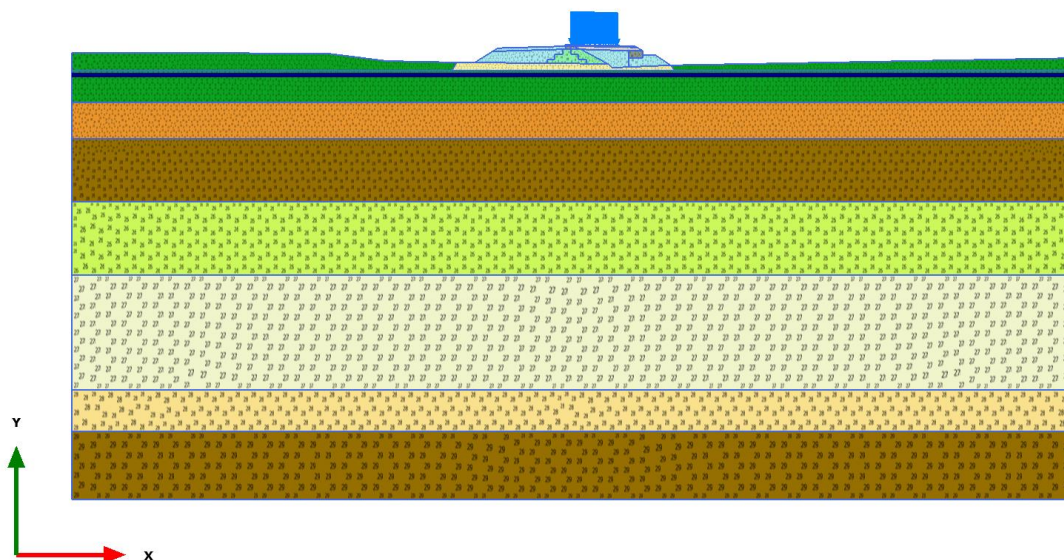
Connectivity plot

1.1.1.9 Calculation results, scavo rilevato sx [Phase_9] (9/66), Connectivity plot



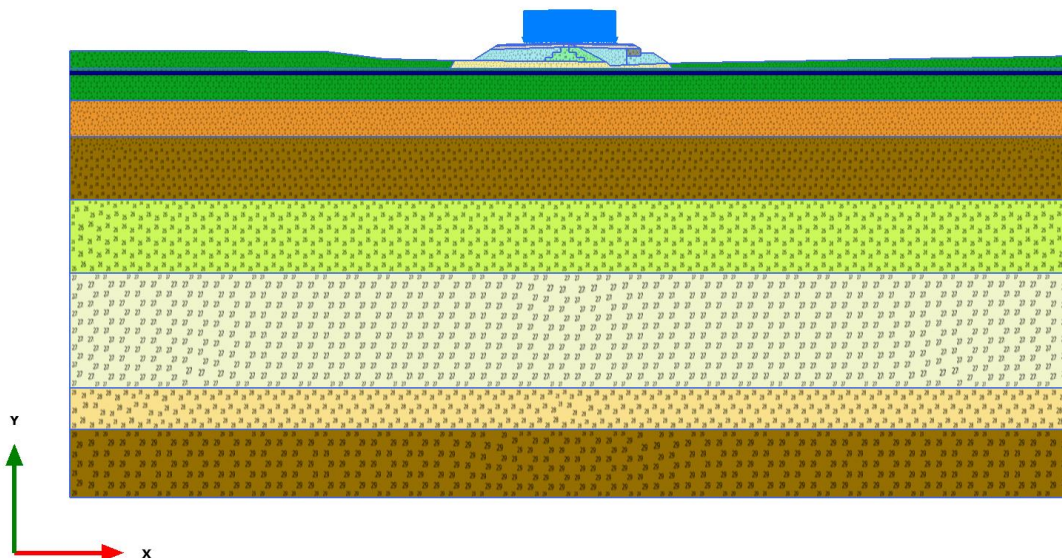
Connectivity plot

1.1.1.10 Calculation results, costruz. rilevato sx [Phase_11] (11/73), Connectivity plot



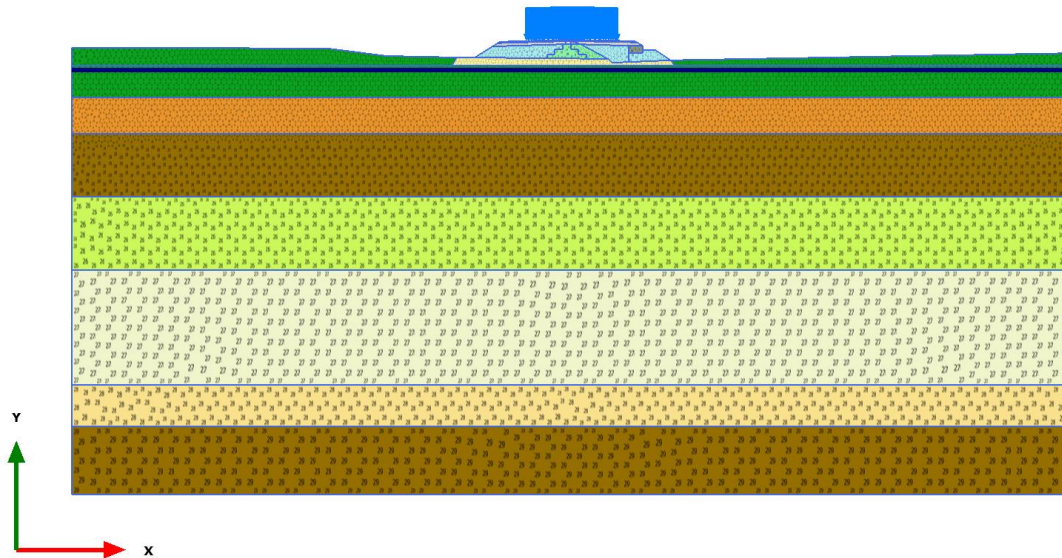
Connectivity plot

1.1.1.11 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/82), Connectivity plot



Connectivity plot

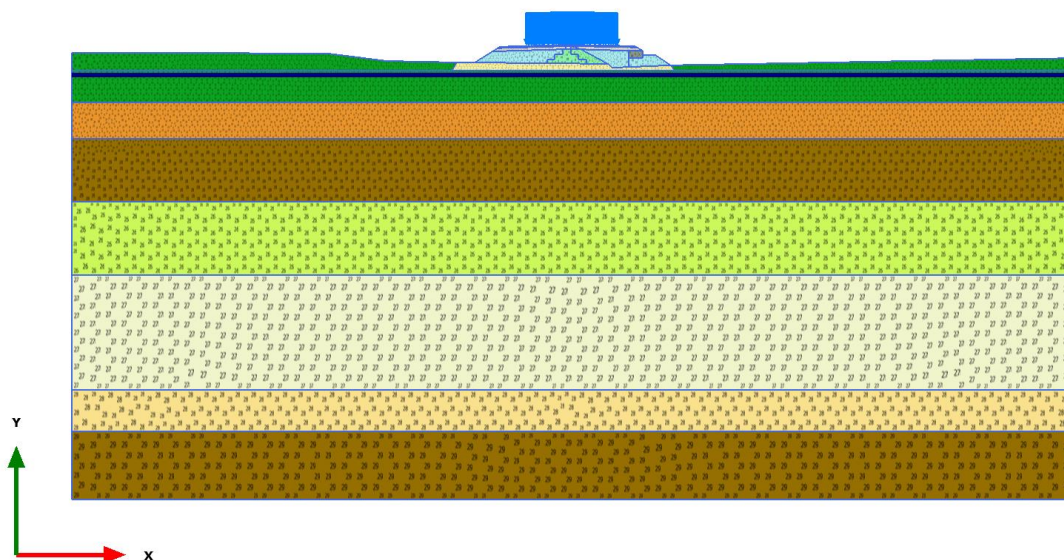
1.1.1.12 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/91), Connectivity plot



Connectivity plot

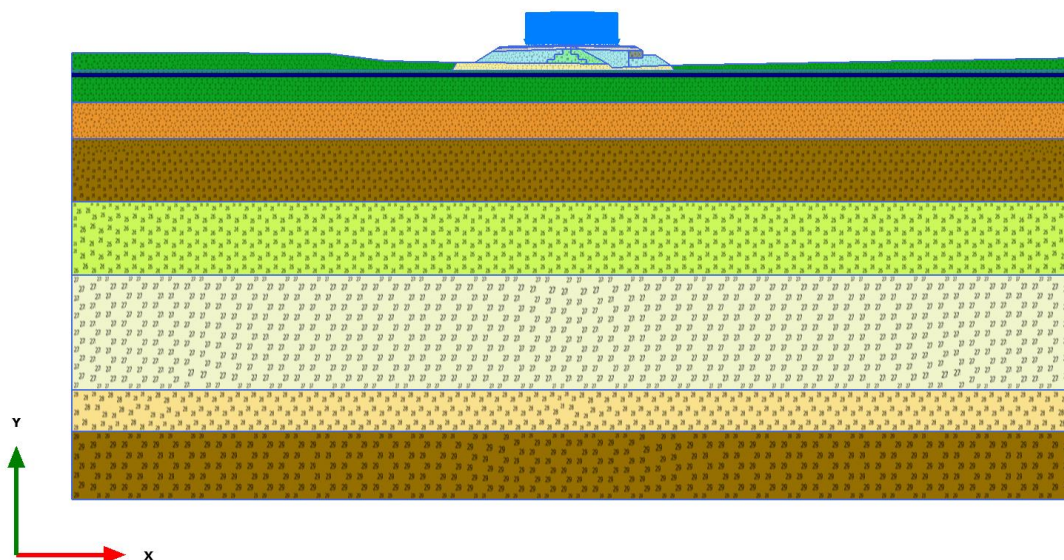
	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 91 di 188

1.1.1.13 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (2 anni) [Phase_15] (15/100), Connectivity plot



Connectivity plot

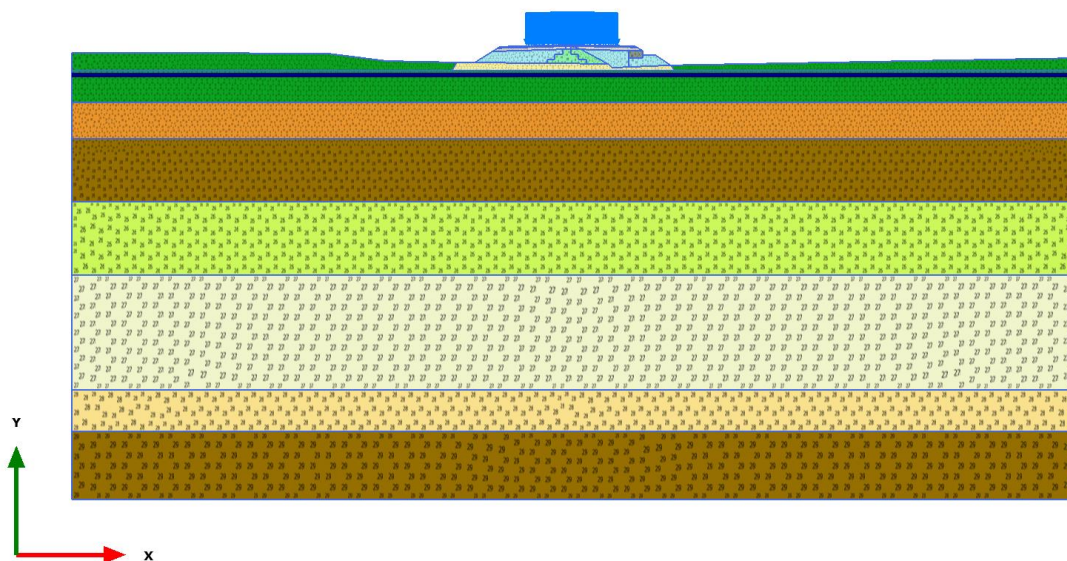
1.1.1.15 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (30 anni) [Phase_17] (17/125), Connectivity plot



Connectivity plot

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 94 di 188

1.1.1.16 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/137), Connectivity plot



Connectivity plot

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 95 di 188

Identification		L,A2	A,L2	L,A1	M	A,L1 NEW
Identification number		1	2	3	5	11
Drainage type		Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)
Colour						
Comments						
γ_{unsat}	kN/m ³	19.00	17.50	18.50	21.00	18.00
γ_{sat}	kN/m ³	19.00	17.50	18.50	21.00	18.00
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0.8500	1.000	1.000	0.5500	0.8000
e_{min}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
e_{max}		999.0	999.0	999.0	999.0	999.0
Rayleigh α		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rayleigh β		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
λ^* (lambda*)		0.06580	0.06087	0.08043	0.04348	0.06522
κ^* (kappa*)		0.01457	0.01478	0.03478	0.01459	8.696E-3
Use alternatives		No	No	No	No	No
C_c		0.2800	0.2800	0.3700	0.1550	0.2700
C_s		0.03100	0.03400	0.08000	0.02600	0.01800

1.1.2.1.1 Materials - Soil and interfaces - Soft soil

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 96 di 188

Identification		L,A2	A,L2	L,A1	M	A,L1 NEW
E _{init}		0.8500	1.000	1.000	0.5500	0.8000
C _{ref}	kN/m ²	0.000	5.000	12.00	20.00	10.00
φ (phi)	°	27.00	20.50	23.50	26.00	22.00
ψ (psi)	°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
V _{ur}		0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
K ₀ ^{nc}		0.5460	0.6498	0.6013	0.5616	0.6254
M		1.440	1.146	1.165	1.333	1.264
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0.9890	0.9890	0.9890	0.9890	0.9890
v _u		0.4950	0.4950	0.4950	0.4950	0.4950
K _{w,ref} / n	kN/m ²	617.7E3	608.8E3	258.7E3	617.0E3	1.035E6
Tension cut-off		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Strength		Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
R _{inter}		0.6600	0.6600	0.6600	0.6600	0.6600
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
δ _{inter}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable

Identification		L,A2	A,L2	L,A1	M	A,L1 NEW
Drainage conductivity, dk	m ³ /day/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K ₀ determination		Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic
K _{0,x} = K _{0,z}		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
K _{0,x}		0.6199	0.9338	0.6437	0.5809	1.164
K _{0,z}		0.6199	0.9338	0.6437	0.5809	1.164
OCR		1.200	1.600	1.100	1.050	2.200
POP	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Data set		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Type		Fine	Fine	Fine	Fine	Coarse
< 2 µm	%	46.00	46.00	46.00	46.00	10.00
2 µm - 50 µm	%	26.00	26.00	26.00	26.00	13.00
50 µm - 2 mm	%	28.00	28.00	28.00	28.00	77.00
Use defaults		None	None	None	None	None
k _x	m/day	0.08640	0.08640E-3	8.640E-3	0.08640E-3	0.08640E-3
k _y	m/day	0.08640	8.640E-6	8.640E-3	0.08640E-3	8.640E-6
-ψ _{unsat}	m	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3
e _{init}		0.8500	1.000	1.000	0.5500	0.8000
S _s	1/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C _k		1000E12	1000E12	1000E12	1000E12	1000E12

Identification		G,S	rilevato	BONIFICO
Identification number		4	7	12
Drainage type		Drained	Drained	Drained
Colour				
Comments				
Y _{unsat}	kN/m ³	19.00	19.00	19.00
Y _{sat}	kN/m ³	19.00	19.00	19.00
Dilatancy cut-off		No	No	No
e _{init}		0.5000	0.5000	0.5000
e _{min}		0.000	0.000	0.000
e _{max}		999.0	999.0	999.0
Rayleigh α		0.000	0.000	0.000
Rayleigh β		0.000	0.000	0.000
E	kN/m ²	50.00E3	30.00E3	15.00E3
ν (nu)		0.2000	0.3000	0.3000
G	kN/m ²	20.83E3	11.54E3	5769
E _{oed}	kN/m ²	55.56E3	40.38E3	20.19E3
C _{ref}	kN/m ²	0.000	0.000	0.000

1.1.2.1.2 Materials - Soil and interfaces - Mohr-Coulomb

Identification		G,S	rilevato	BONIFICO
ϕ (phi)	°	36.00	38.00	32.00
ψ (psi)	°	0.000	0.000	0.000
V_s	m/s	103.7	77.18	54.58
V_p	m/s	169.4	144.4	102.1
Set to default values		Yes	Yes	Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0.000	0.000	0.000
γ_{ref}	m	0.000	0.000	0.000
C_{inc}	kN/m ² /m	0.000	0.000	0.000
γ_{ref}	m	0.000	0.000	0.000
Tension cut-off		Yes	Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0.000	0.000	0.000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0.9866	0.9783	0.9783
v_u		0.4950	0.4950	0.4950
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	2.049E6	1.125E6	562.5E3
Strength		Manual	Manual	Manual
R_{inter}		0.6600	0.6600	0.6600
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0.000	0.000	0.000

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 100 di 188

Identification		G,S	rilevato	BONIFICO
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity, dk	m ³ /day/m	0.000	0.000	0.000
K ₀ determination		Automatic	Automatic	Automatic
K _{0,x} = K _{0,z}		Yes	Yes	Yes
K _{0,x}		0.4122	0.3843	0.4701
K _{0,z}		0.4122	0.3843	0.4701
OCR		1.000	1.000	1.000
POP	kN/m ²	0.000	0.000	0.000
Data set		Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Medium	Coarse
< 2 µm	%	10.00	19.00	10.00
2 µm - 50 µm	%	13.00	41.00	13.00
50 µm - 2 mm	%	77.00	40.00	77.00
Use defaults		None	From data set	None
k _x	m/day	8.640	0.1206	0.08640
k _y	m/day	8.640	0.1206	0.08640
-ψ _{unsat}	m	10.00E3	10.00E3	10.00E3
e _{init}		0.5000	0.5000	0.5000
S _s	1/m	0.000	0.000	0.000

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 101 di 188

Identification	G,S	rilevato	BONIFICO
C _k	1000E12	1000E12	1000E12

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 102 di 188

Identification		supercompattato	sub-ballast	cls	Rilevato esistente	pali
Identification number		6	8	9	10	13
Drainage type		Drained	Drained	Non-porous	Drained	Non-porous
Colour						
Comments						
γ_{unsat}	kN/m ³	20.00	20.00	25.00	19.00	25.00
γ_{sat}	kN/m ³	20.00	20.00	25.00	19.00	25.00
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0.5000	0.5000	0.000	0.5000	0.000
e_{min}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
e_{max}		999.0	999.0	999.0	999.0	999.0
Rayleigh α		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rayleigh β		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E	kN/m ²	60.00E3	460.0E3	25.00E6	30.00E3	4.909E6
ν (nu)		0.3000	0.3000	0.1000	0.3000	0.1000
G	kN/m ²	23.08E3	176.9E3	11.36E6	11.54E3	2.231E6
E_{oed}	kN/m ²	80.77E3	619.2E3	25.57E6	40.38E3	5.020E6
V_s	m/s	106.4	294.6	2112	77.18	935.7
V_p	m/s	199.0	551.1	3167	144.4	1404

1.1.2.1.3 Materials - Soil and interfaces - Linear elastic

Identification		supercompattato	sub-ballast	cls	Rilevato esistente	pali
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
E _{inc}	kN/m ² /m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Y _{ref}	m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0.9783	0.9783	0.9908	0.9783	0.9908
v _u		0.4950	0.4950	0.4950	0.4950	0.4950
K _{w,ref} / n	kN/m ²	2.250E6	17.25E6	1.122E9	1.125E6	220.3E6
Strength		Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
R _{inter}		0.1000	0.1000	0.1000	0.6600	0.6600
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
δ _{inter}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity, dk	m ³ /day/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K ₀ determination		Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic
K _{0,x} = K _{0,z}		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
K _{0,x}		0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
K _{0,z}		0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
OCR		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
POP	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Data set		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Type		Medium fine	Coarse	Coarse	Medium	Coarse

Identification		supercompattato	sub-ballast	cls	Rilevato esistente	pali
< 2 µm	%	19.00	10.00	10.00	19.00	10.00
2 µm - 50 µm	%	74.00	13.00	13.00	41.00	13.00
50 µm - 2 mm	%	7.000	77.00	77.00	40.00	77.00
Use defaults		None	None	None	From data set	None
k _x	m/day	0.08640E-3	0.000	0.000	0.1206	0.000
k _y	m/day	0.08640E-3	0.000	0.000	0.1206	0.000
-ψ _{unsat}	m	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3
e _{init}		0.5000	0.5000	0.000	0.5000	0.000
S _s	1/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C _k		1000E12	1000E12	1000E12	1000E12	1000E12

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 105 di 188

Identification	L(S)
Identification number	14
Drainage type	Drained
Colour	
Comments	
Y _{unsat}	kN/m ³ 19.00
Y _{sat}	kN/m ³ 19.00
Dilatancy cut-off	No
e _{init}	0.5000
e _{min}	0.000
e _{max}	999.0
Rayleigh α	0.000
Rayleigh β	0.000
E ₅₀ ^{ref}	kN/m ² 4500
E _{oed} ^{ref}	kN/m ² 4500
E _{ur} ^{ref}	kN/m ² 9000
power (m)	0.5000
Use alternatives	No

1.1.2.1.4 Materials - Soil and interfaces - Hardening soil

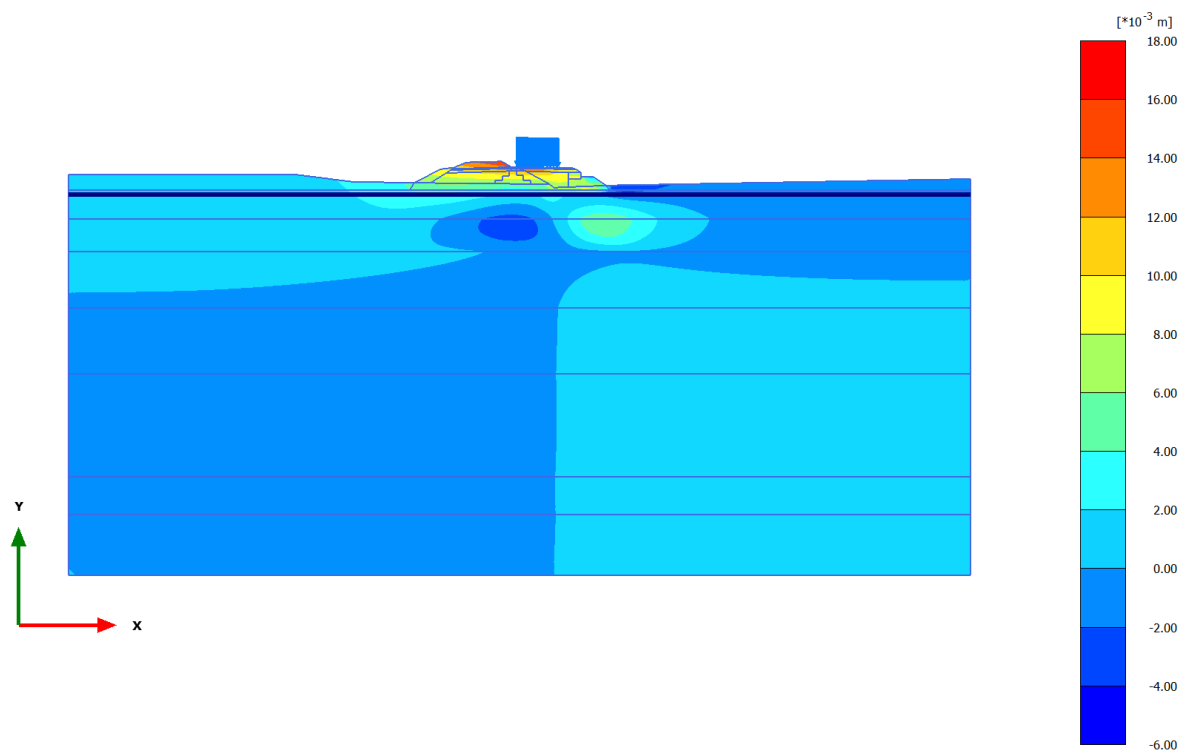
Identification		L(S)
C _c		0.07667
C _s		0.03450
e _{init}		0.5000
C _{ref}	kN/m ²	0.000
φ (phi)	°	30.00
ψ (psi)	°	0.000
Set to default values		Yes
V _{ur}		0.2000
p _{ref}	kN/m ²	100.0
K ₀ ^{nc}		0.5000
C _{inc}	kN/m ² /m	0.000
γ _{ref}	m	0.000
R _f		0.9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0.000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0.9866
V _u		0.4950
K _{w,ref} / n	kN/m ²	368.7E3

Identification		L(S)
Strength		Manual
R_{inter}		0.6600
Consider gap closure		Yes
δ_{inter}		0.000
Cross permeability		Impermeable
Drainage conductivity, dk	$m^3/day/m$	0.000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0.5000
$K_{0,z}$		0.5000
OCR		1.000
POP	kN/m^2	0.000
Data set		Standard
Type		Coarse
< 2 μm	%	10.00
2 μm - 50 μm	%	13.00
50 μm - 2 mm	%	77.00
Use defaults		None
k_x	m/day	0.08640

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 108 di 188

Identification	L(S)
k_y	m/day0.08640
$-\psi_{\text{unsat}}$	m10.00E3
e_{init}	0.5000
S_s	1/m0.000
C_k	1000E12

2.1.1.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/56), Total displacements u_x

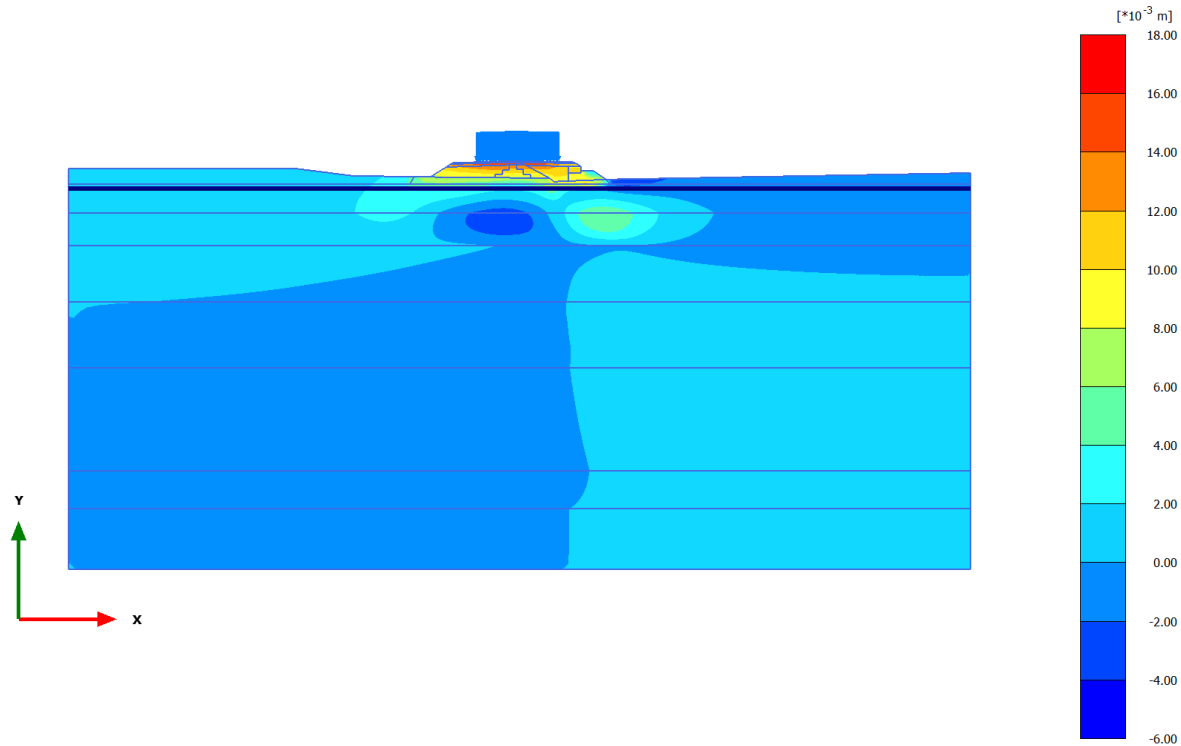


Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 19.34*10³ day)

Maximum value = 0.01599 m (Element 260 at Node 5190)

Minimum value = -4.250*10⁻³ m (Element 1963 at Node 11893)

2.1.1.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/82), Total displacements u_x

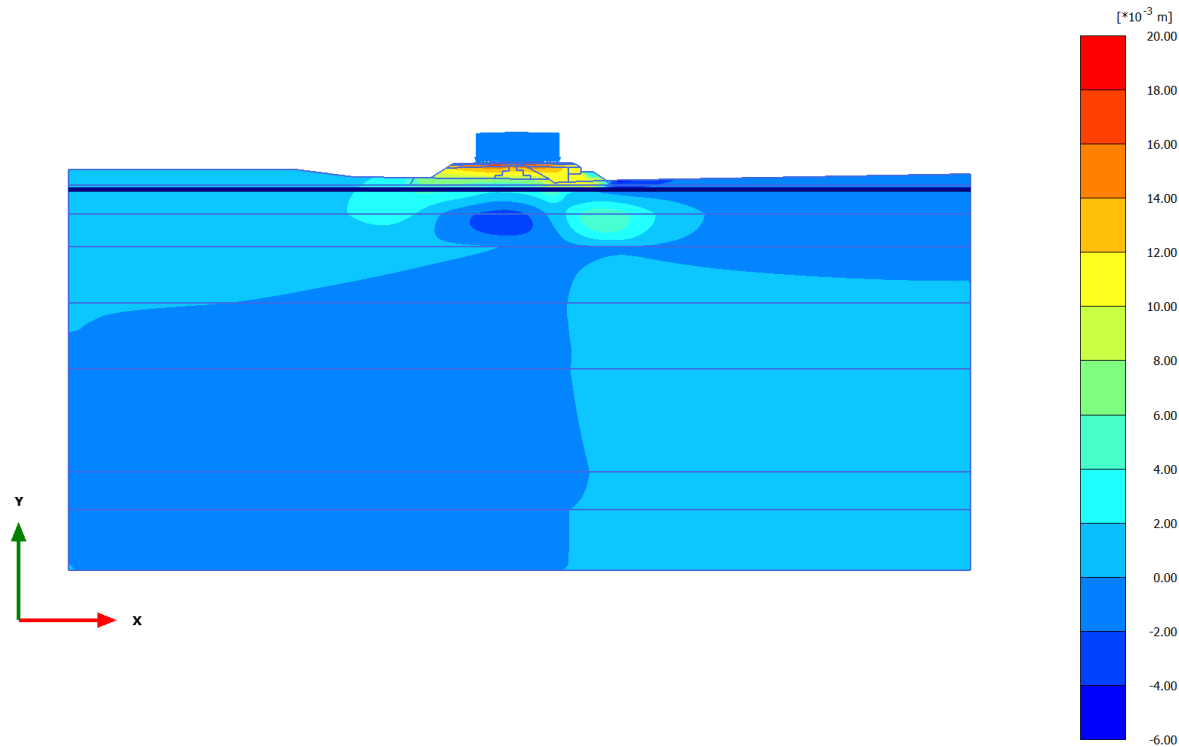


Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 0.01689 m (Element 202 at Node 5857)

Minimum value = $-4.226 \cdot 10^{-3}$ m (Element 1963 at Node 11893)

2.1.1.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/91), Total displacements u_x



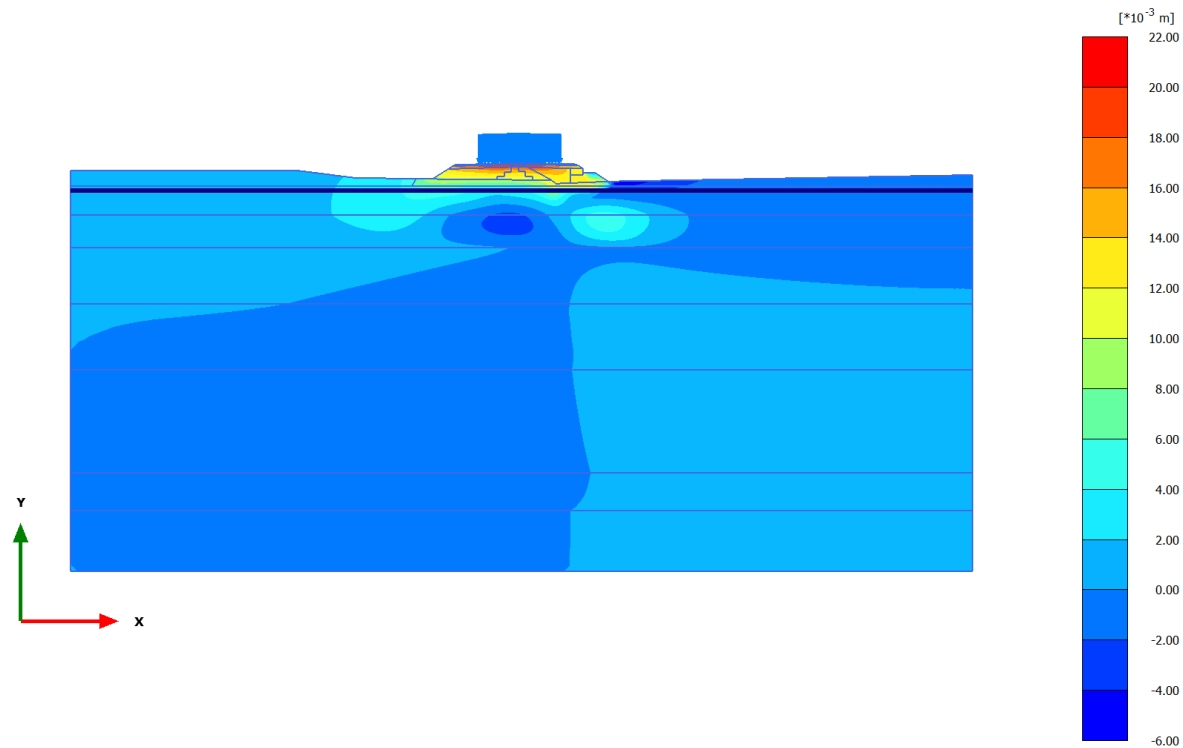
Total displacements u_x (scaled up 100 times) (Time 20.04*10³ day)

Maximum value = 0.01825 m (Element 225 at Node 5852)

Minimum value = -4.628*10⁻³ m (Element 1968 at Node 11885)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 112 di 188

2.1.1.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/137), Total displacements u_x

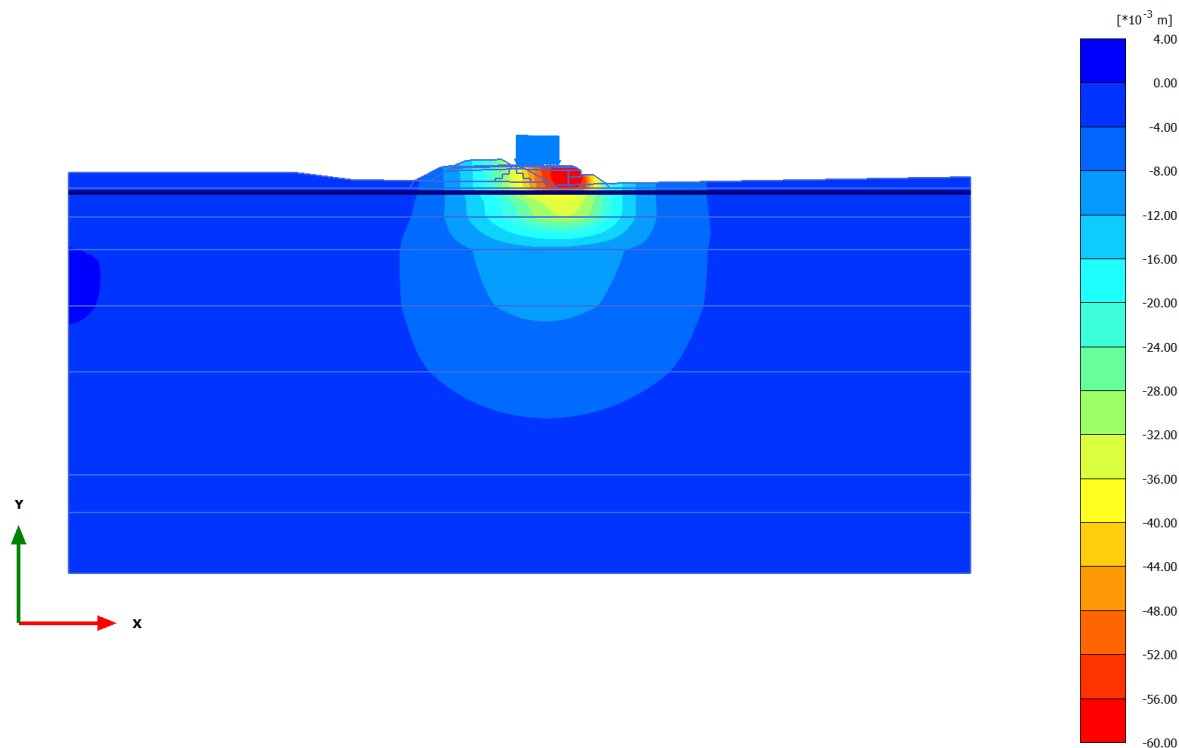


Total displacements u_x (scaled up 100 times) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 0.02108 m (Element 225 at Node 5852)

Minimum value = $-5.868 \cdot 10^{-3}$ m (Element 1968 at Node 11885)

2.1.1.2.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/56), Total displacements u_y

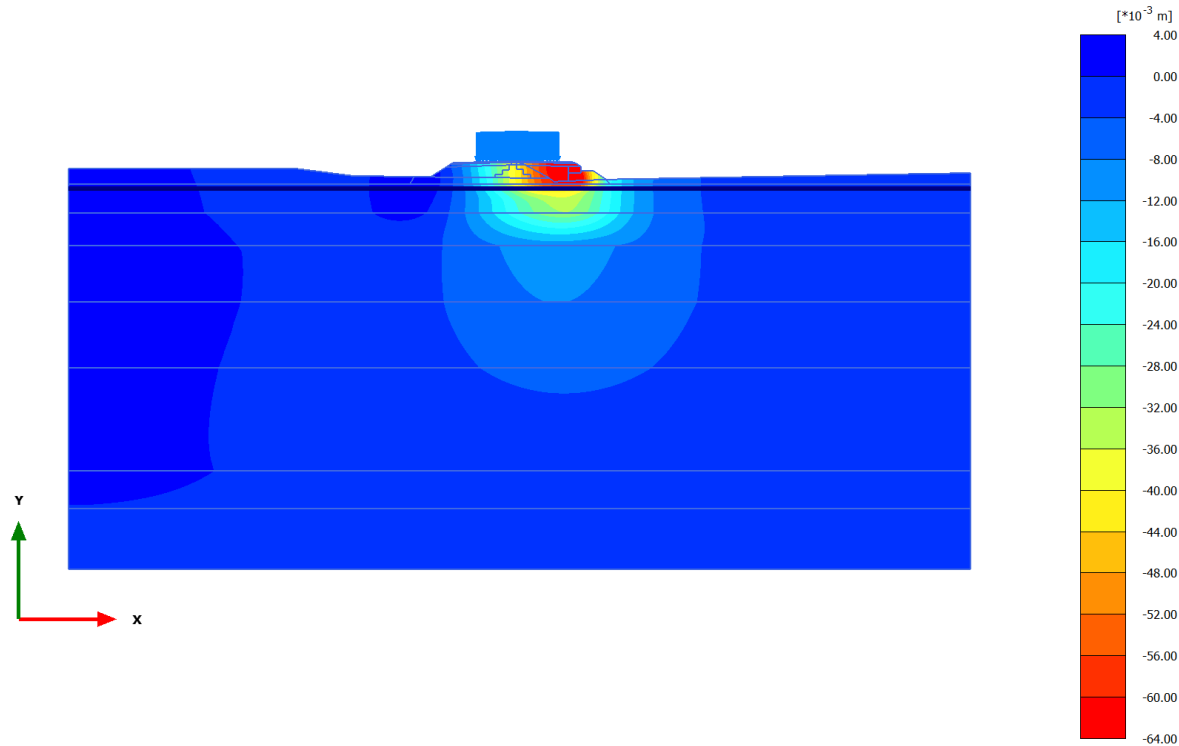


Total displacements u_y (scaled up 50.0 times) (Time $19.34 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = $0.01779 \cdot 10^{-3}$ m (Element 8056 at Node 2186)

Minimum value = -0.05787 m (Element 826 at Node 10153)

2.1.1.2.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/82), Total displacements u_y

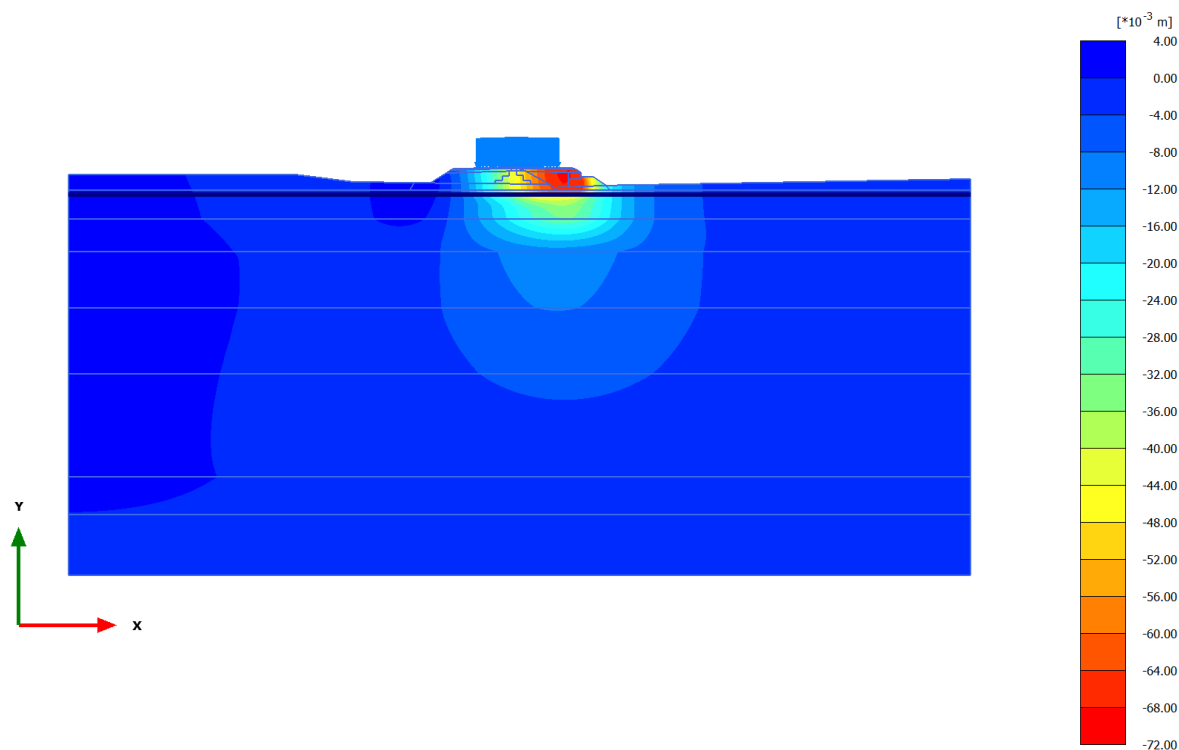


Total displacements u_y (scaled up 50.0 times) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = $3.711 \cdot 10^{-3}$ m (Element 2207 at Node 5738)

Minimum value = -0.06369 m (Element 831 at Node 10152)

2.1.1.2.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/91), Total displacements u_y



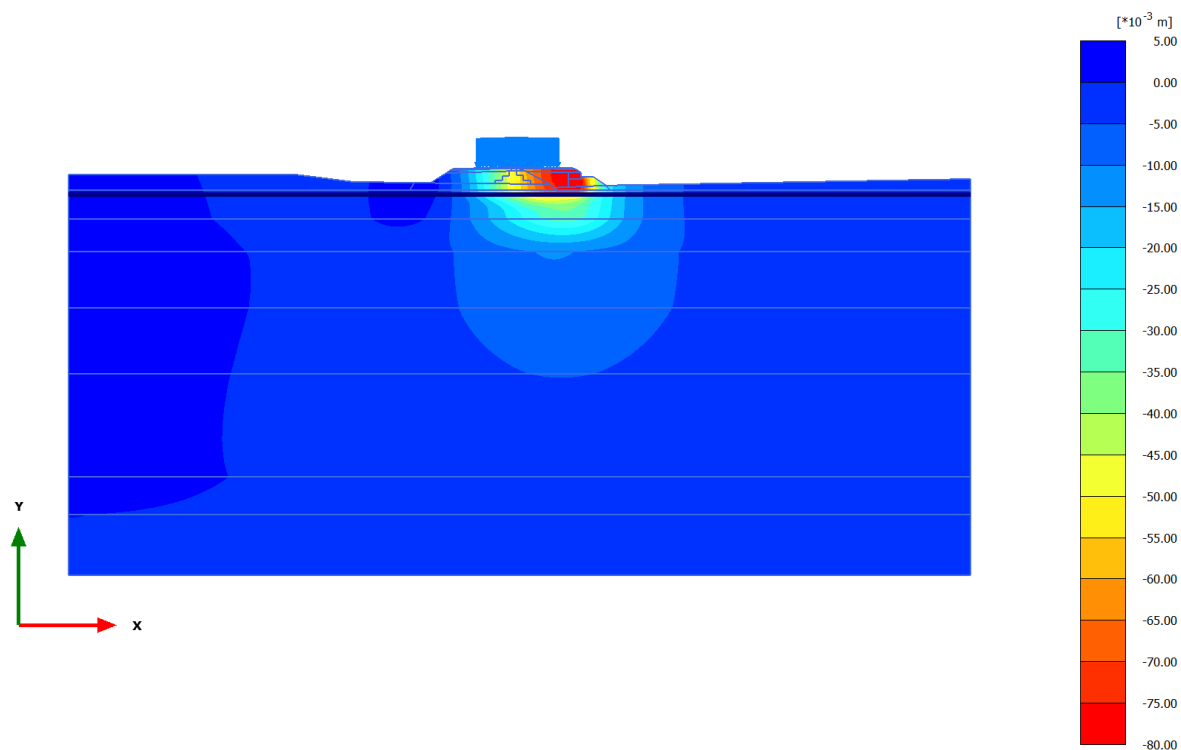
Total displacements u_y (scaled up 50.0 times) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = $3.542 \cdot 10^{-3}$ m (Element 2214 at Node 5230)

Minimum value = -0.06833 m (Element 826 at Node 10153)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 116 di 188

2.1.1.2.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/137), Total displacements u_y



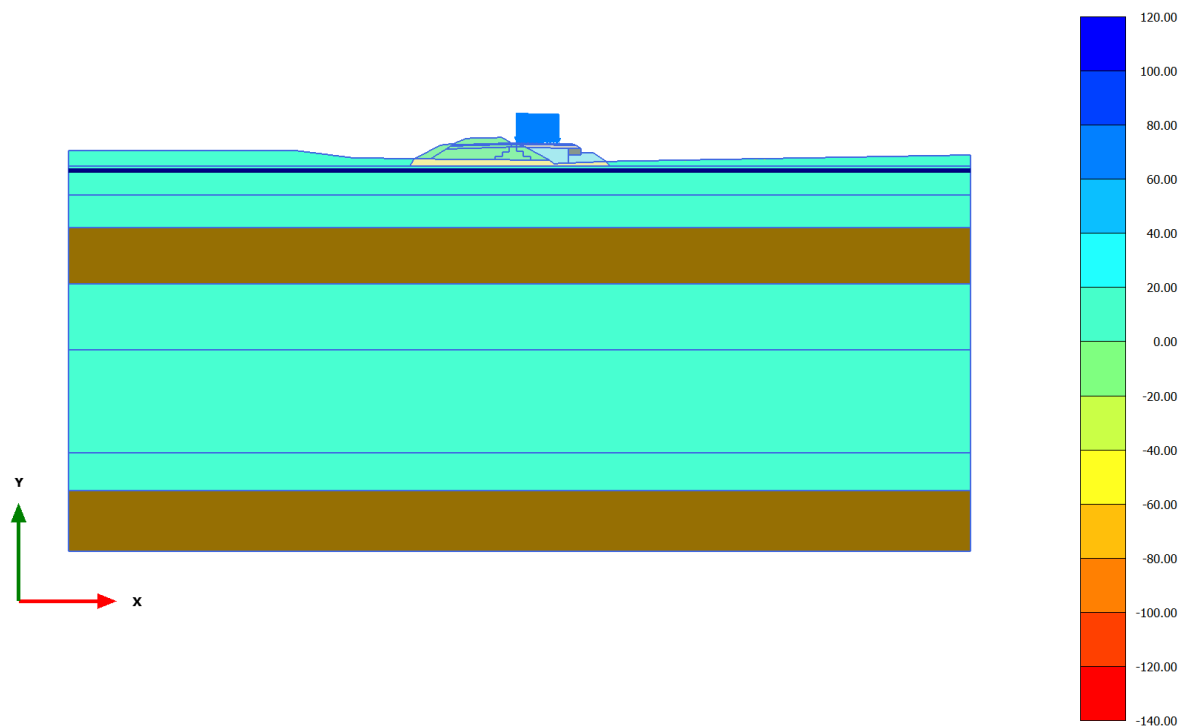
Total displacements u_y (scaled up 50.0 times) (Time 47.04*10³ day)

Maximum value = 3.499*10⁻³ m (Element 2214 at Node 5230)

Minimum value = -0.07690 m (Element 826 at Node 10155)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 117 di 188

2.2.1.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/56), Isotropic overconsolidation ratio



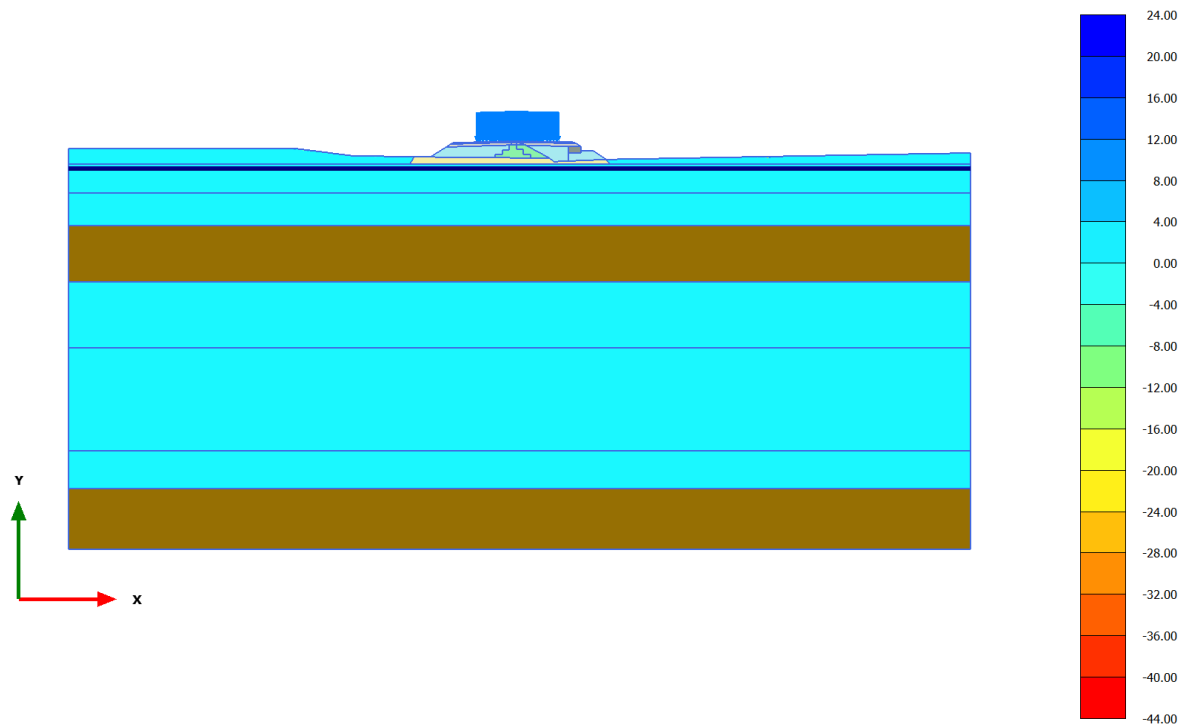
Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0100 times) (Time $19.34 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 107.0 (Element 1553 at Node 4872)

Minimum value = -124.8 (Element 1767 at Node 17467)

	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 118 di 188

2.2.1.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/82), Isotropic overconsolidation ratio



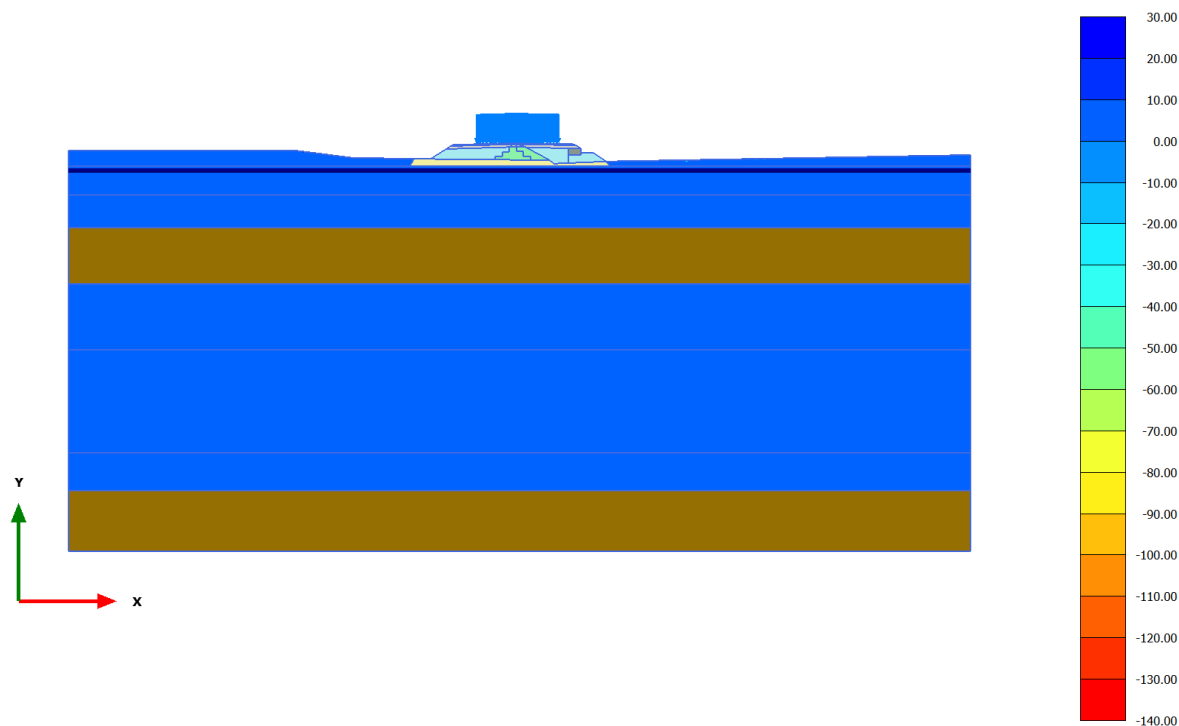
Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0500 times) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 20.94 (Element 1762 at Node 17645)

Minimum value = -40.88 (Element 1554 at Node 4879)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 119 di 188

2.2.1.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/91), Isotropic overconsolidation ratio



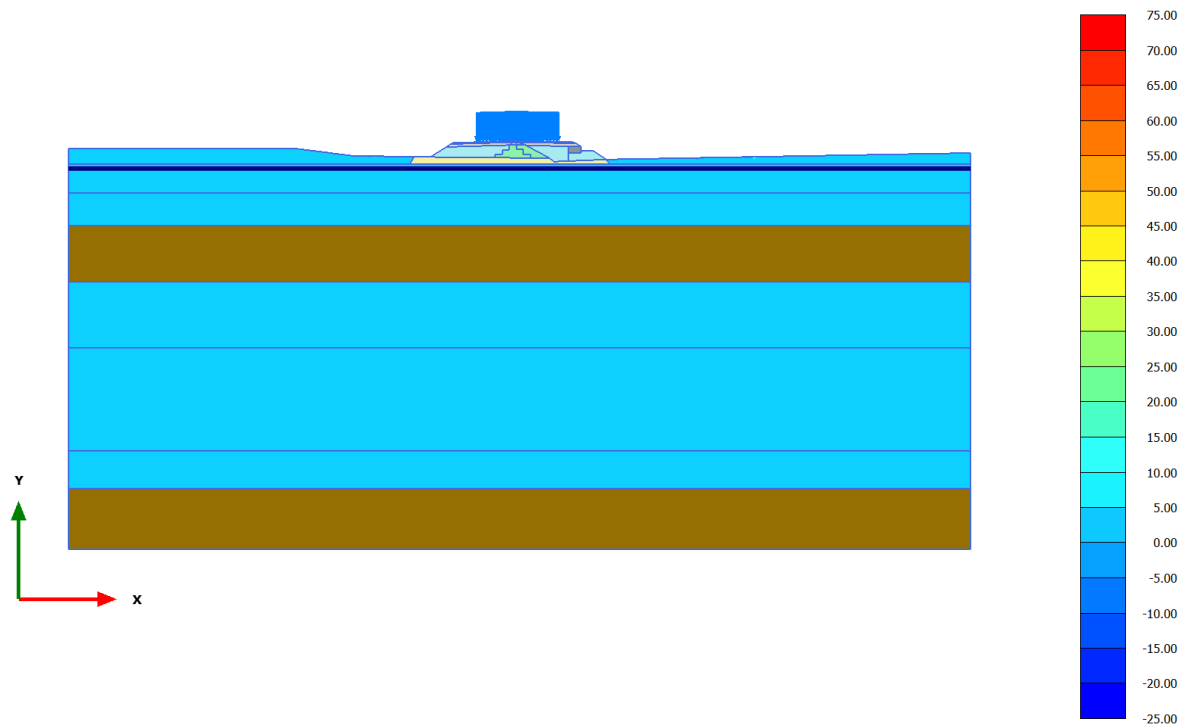
Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0200 times) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 26.13 (Element 1161 at Node 1952)

Minimum value = -139.2 (Element 1869 at Node 14487)

 GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 120 di 188

2.2.1.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/137), Isotropic overconsolidation ratio



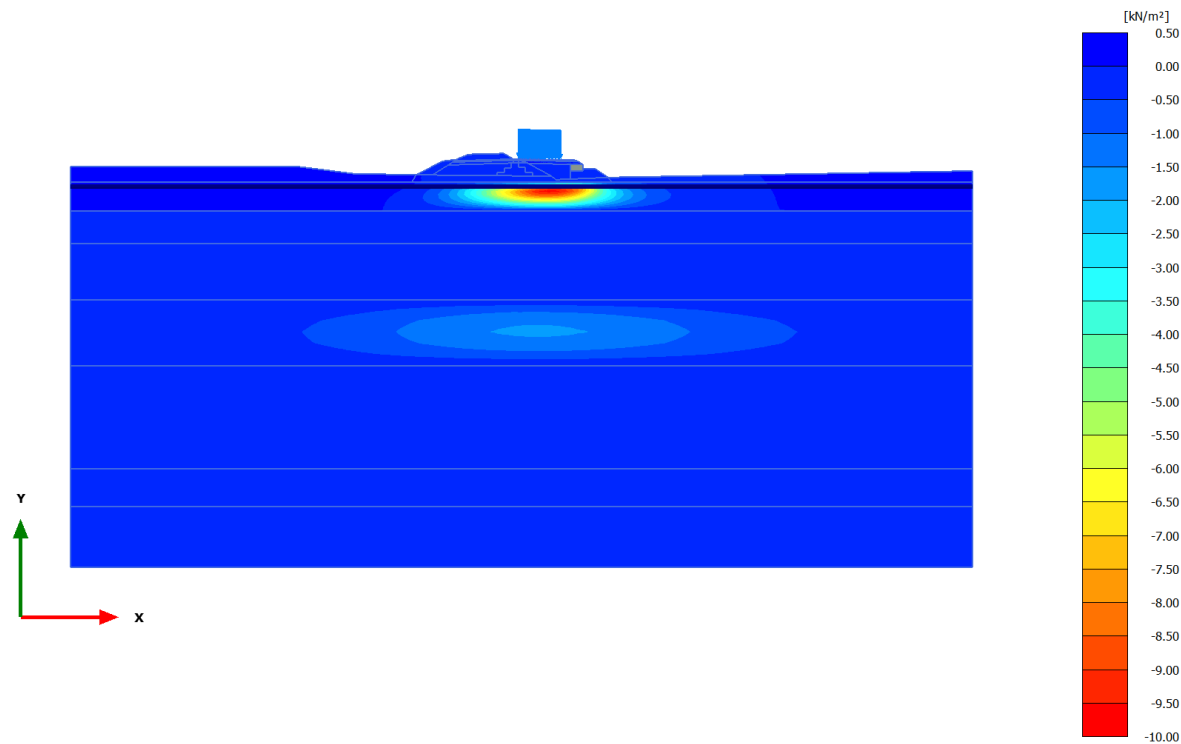
Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0500 times) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 70.44 (Element 1776 at Node 16959)

Minimum value = -22.54 (Element 1554 at Node 4879)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 121 di 188

2.2.2.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/56), Excess pore pressures p_{excess}



Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 0.500 times) (Pressure = negative) (Time $19.34 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 0.1668 kN/m² (Element 3917 at Node 3547)

Minimum value = -9.777 kN/m² (Element 4220 at Node 11474)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA. RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 122 di 188

2.2.2.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/82), Excess pore pressures p_{excess}



Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 0.0200 times) (Pressure = negative) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 12.19 kN/m² (Element 128 at Node 7135)

Minimum value = -105.2 kN/m² (Element 45 at Node 6451)

2.2.2.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/91), Excess pore pressures p_{excess}



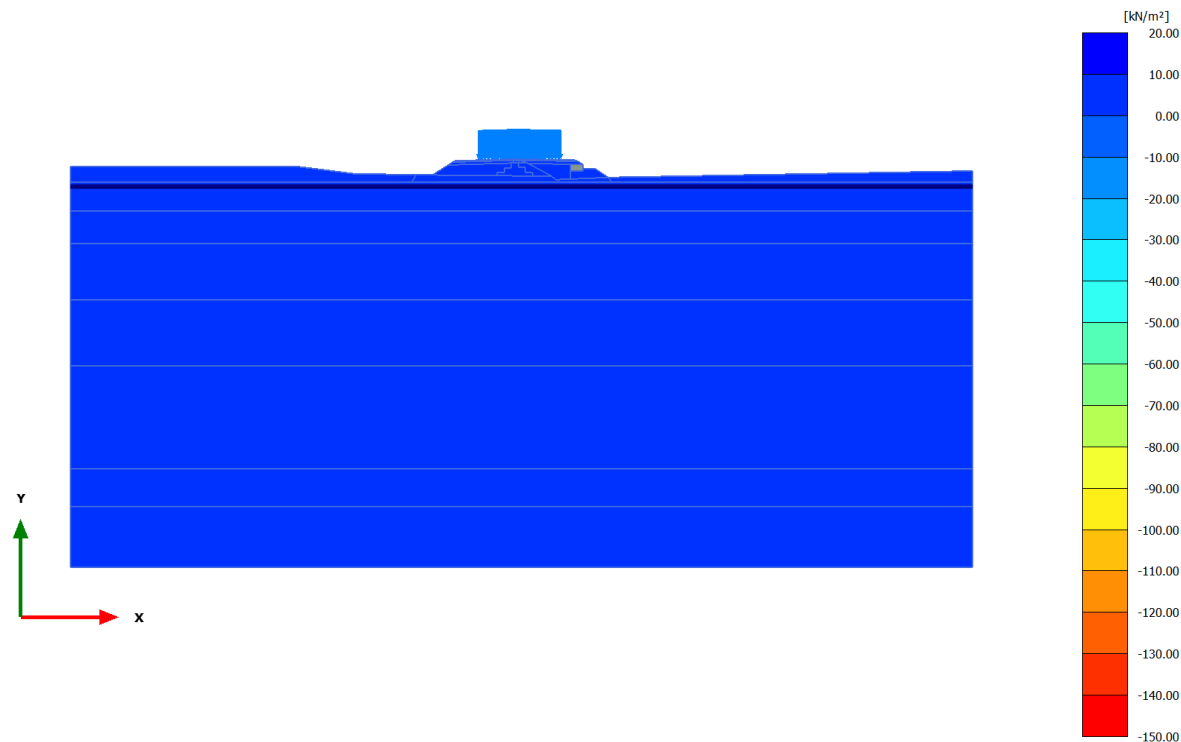
Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 0.0200 times) (Pressure = negative) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 8.605 kN/m² (Element 176 at Node 5050)

Minimum value = -128.4 kN/m² (Element 45 at Node 6451)

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA – PESCARA RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA – CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM SAN GIOVANNI TEATINO PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA					
RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3	COMMESSA IA4S	LOTTO 01 D29	CODIFICA CL	DOCUMENTO GE0006 002	REV. A	FOGLIO 124 di 188

2.2.2.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/137), Excess pore pressures p_{excess}

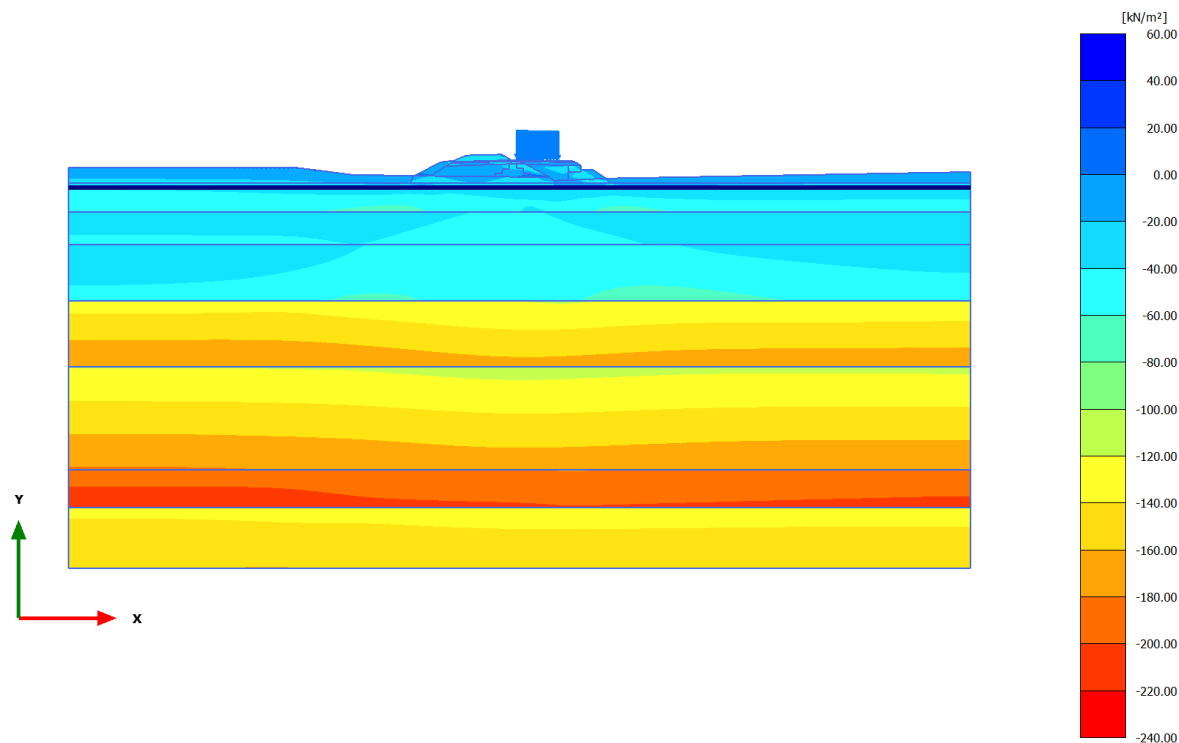


Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 0.0200 times) (Pressure = negative) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 14.19 kN/m² (Element 176 at Node 5050)

Minimum value = -140.5 kN/m² (Element 45 at Node 6451)

2.2.3.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/56), Cartesian effective stress σ'_{xx}

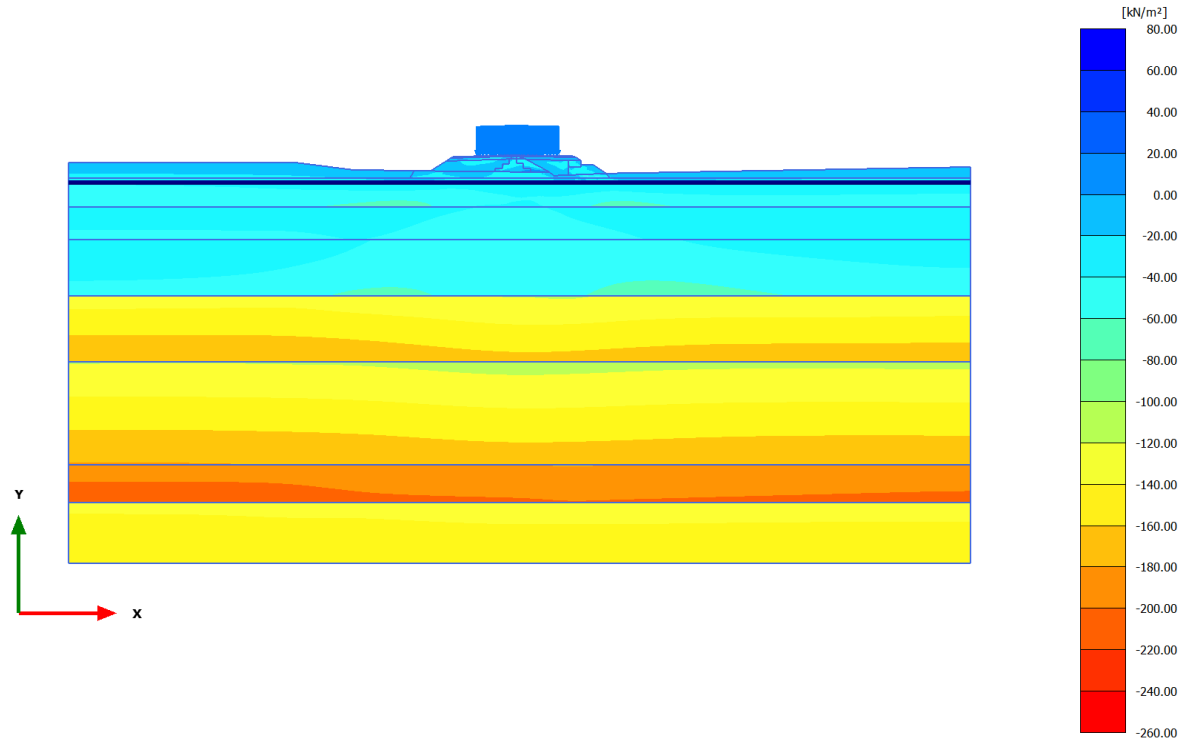


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up 0.0100 times) (Time 19.34*10³ day)

Maximum value = 42.03 kN/m² (Element 802 at Node 9881)

Minimum value = -225.3 kN/m² (Element 56 at Node 7339)

2.2.3.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/82), Cartesian effective stress σ'_{xx}

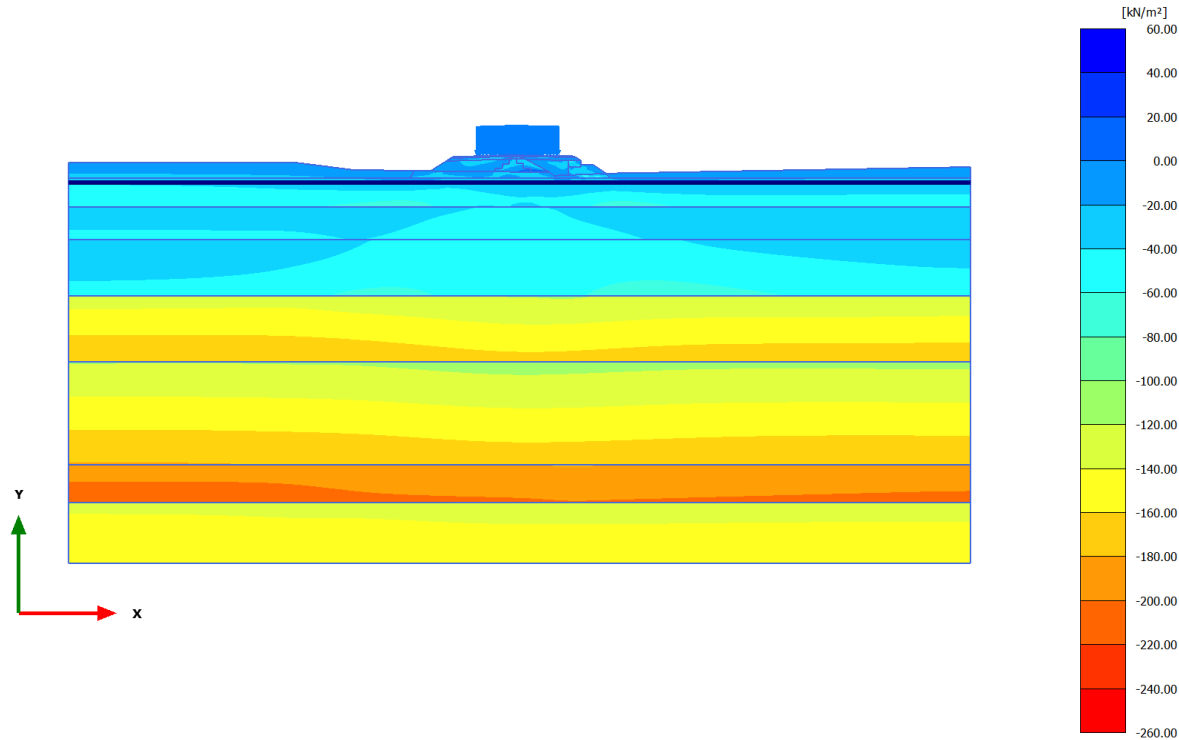


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up 0.0100 times) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 67.60 kN/m² (Element 2 at Node 6470)

Minimum value = -242.0 kN/m² (Element 56 at Node 7343)

2.2.3.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/91), Cartesian effective stress σ'_{xx}

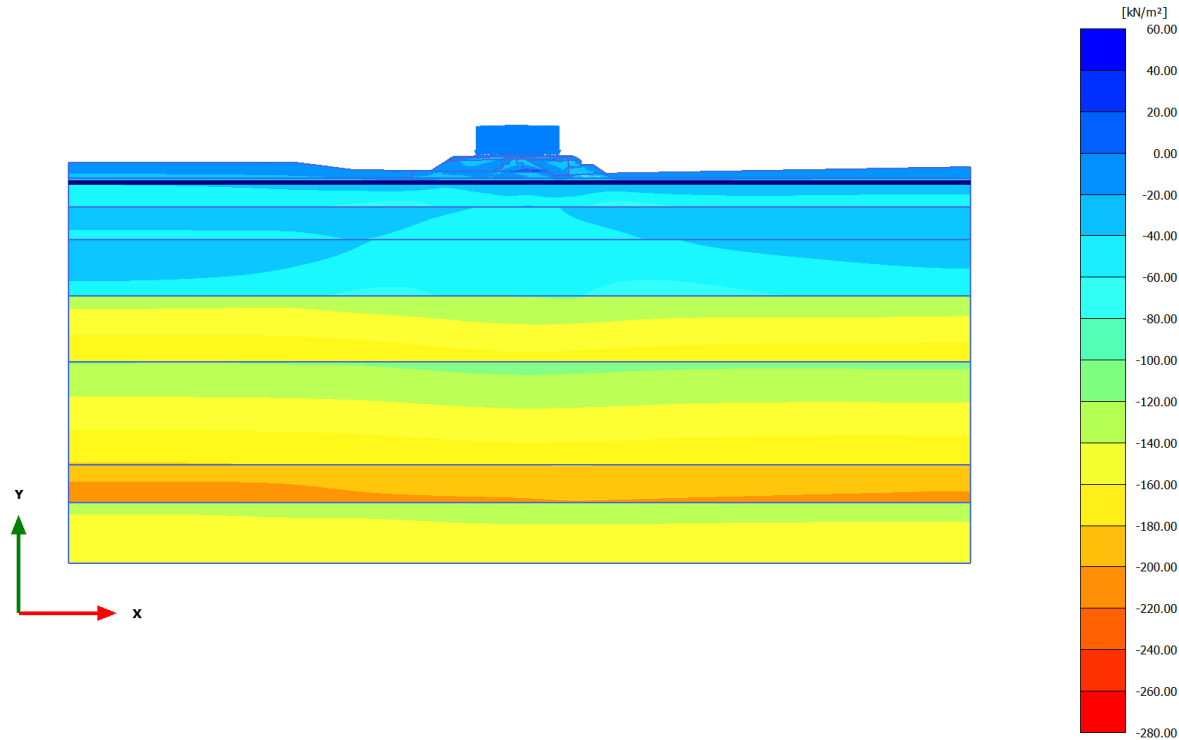


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up 0.0100 times) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 43.31 kN/m² (Element 2 at Node 6470)

Minimum value = -254.3 kN/m² (Element 56 at Node 7343)

2.2.3.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/137), Cartesian effective stress σ'_{xx}

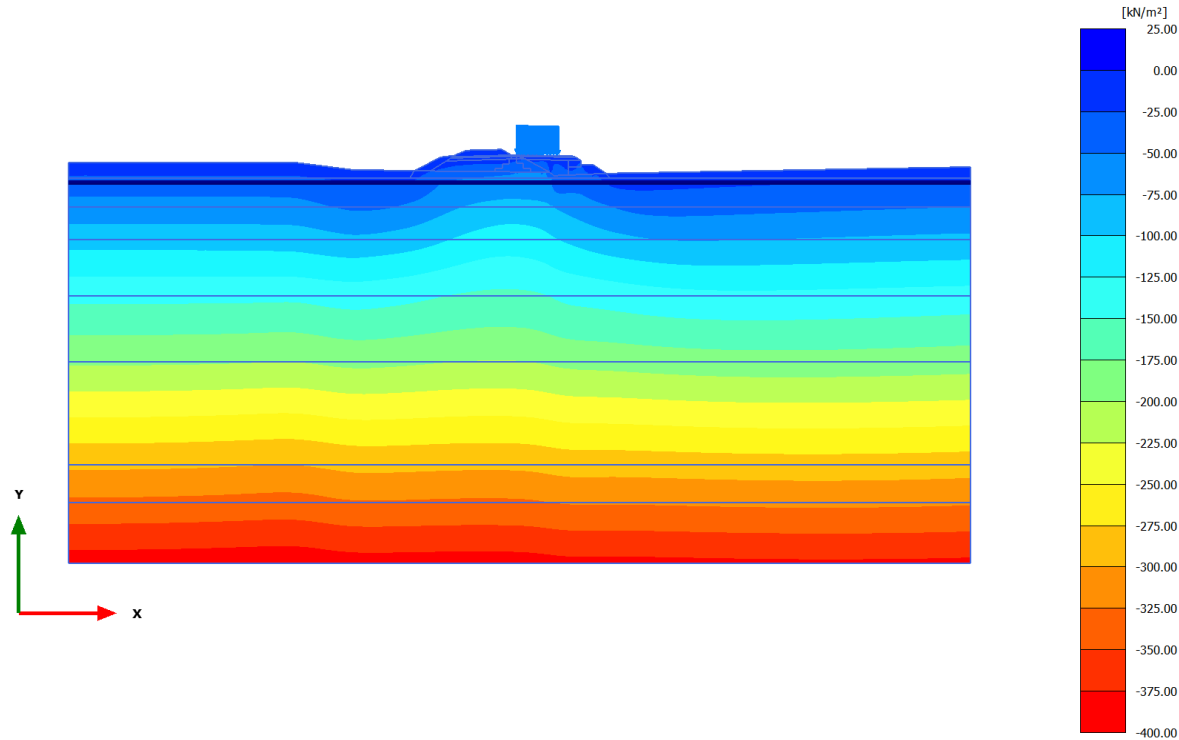


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up 0.0100 times) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 42.53 kN/m² (Element 802 at Node 9881)

Minimum value = -262.0 kN/m² (Element 56 at Node 7343)

2.2.3.2.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/56), Cartesian effective stress σ'_{yy}

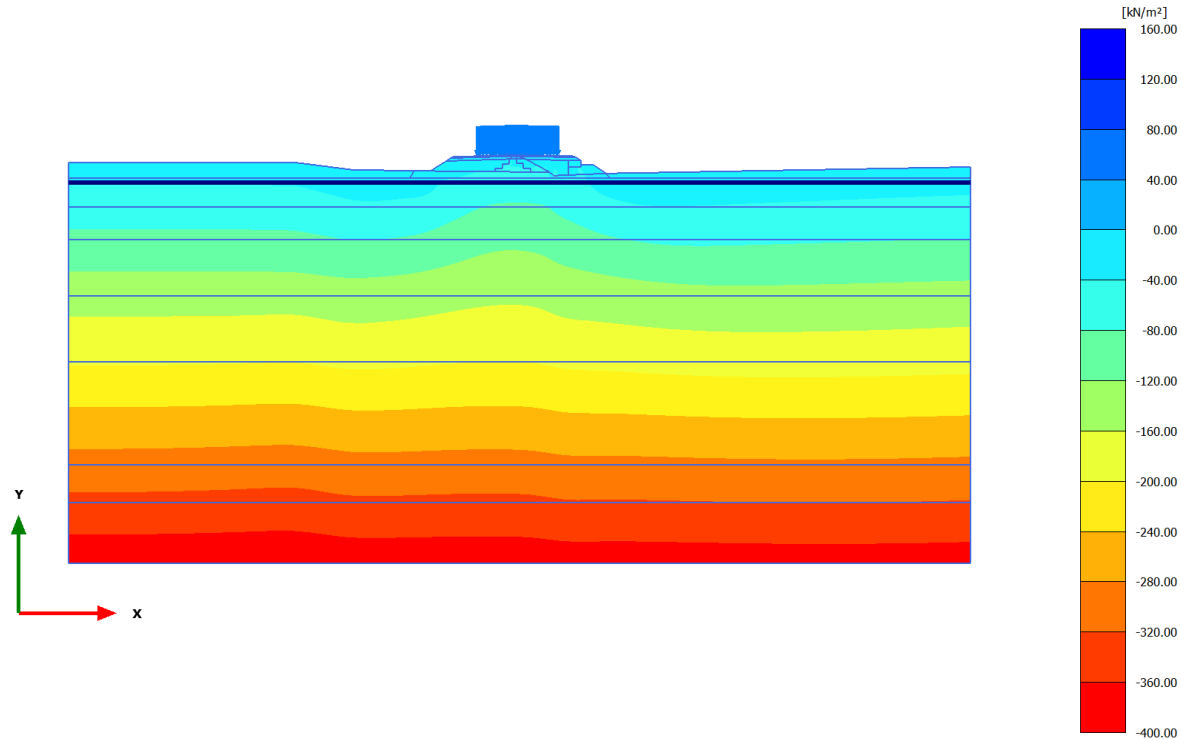


Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $19.34 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 18.27 kN/m² (Element 30 at Node 5953)

Minimum value = -391.4 kN/m² (Element 11304 at Node 8769)

2.2.3.2.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/82), Cartesian effective stress σ'_{yy}

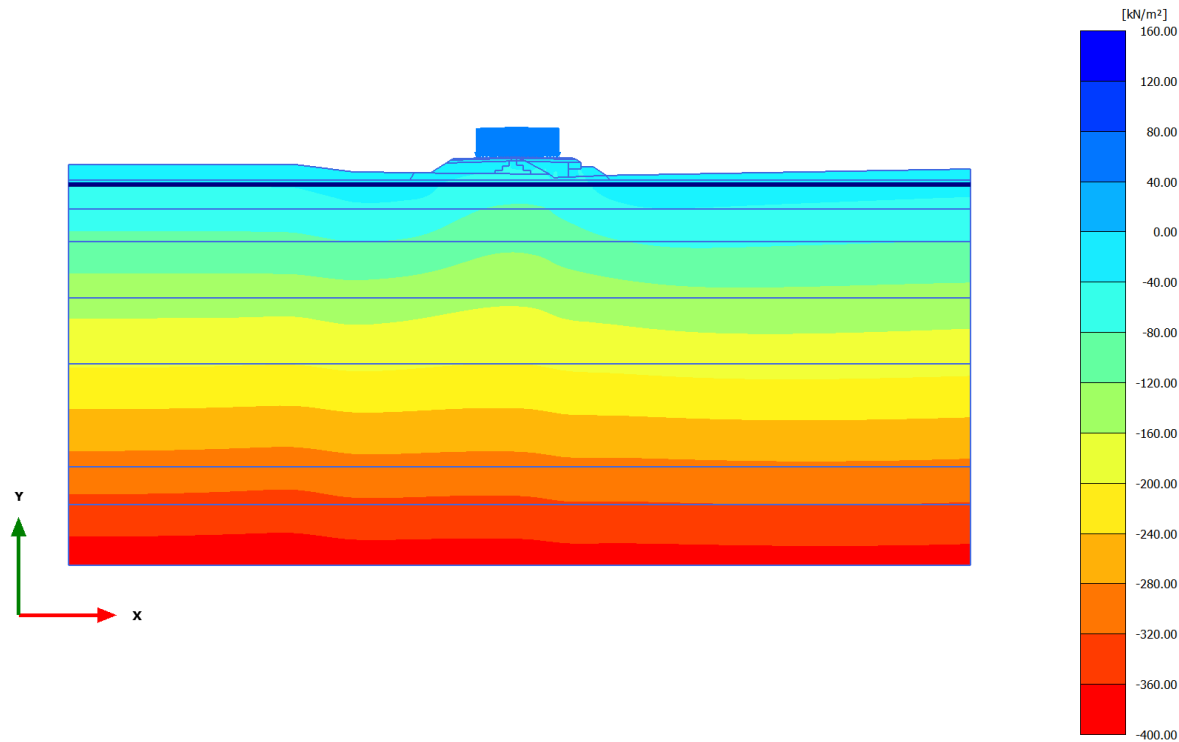


Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 119.5 kN/m² (Element 1 at Node 6461)

Minimum value = -390.8 kN/m² (Element 11304 at Node 8769)

2.2.3.2.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/91), Cartesian effective stress σ'_{yy}

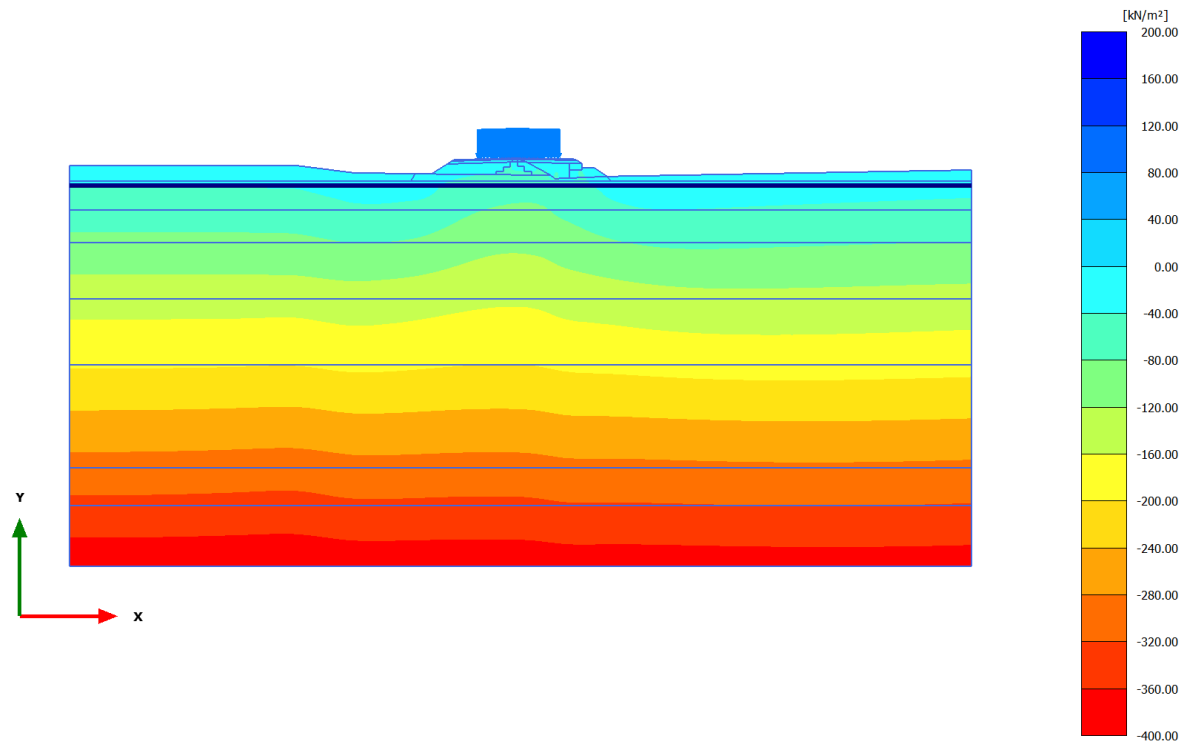


Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 148.9 kN/m² (Element 1 at Node 6461)

Minimum value = -390.8 kN/m² (Element 11304 at Node 8769)

2.2.3.2.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/137), Cartesian effective stress σ'_{yy}



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 165.7 kN/m² (Element 1 at Node 6461)

Minimum value = -390.7 kN/m² (Element 11304 at Node 8769)



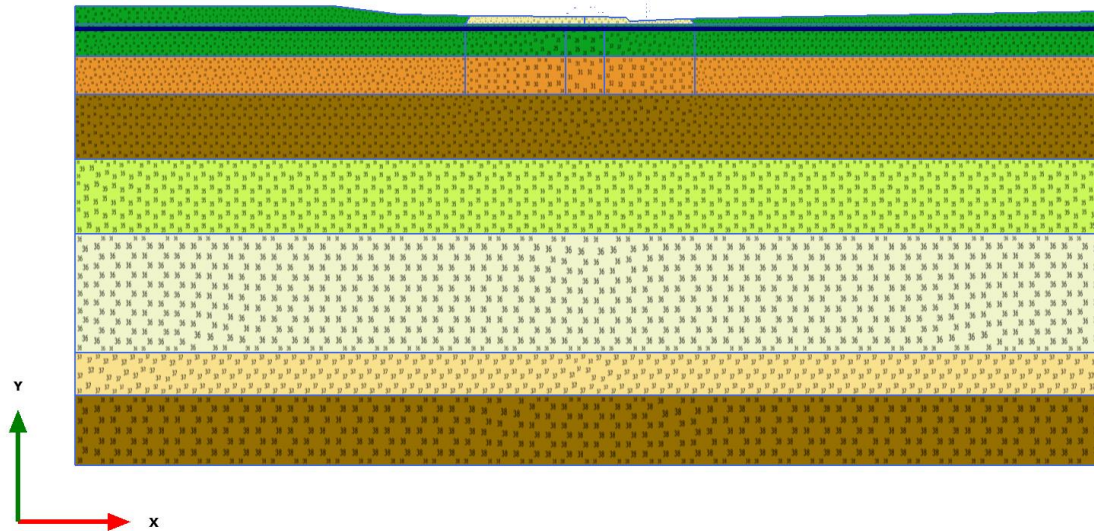
VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA - PESCARA.
RADDOPPIO FERROVIARIO TRATTA PESCARA PORTA NUOVA
- CHIETI. LOTTO 1: TRATTA PESCARA PORTA NUOVA - PM
SAN GIOVANNI TEATINO
PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA

RELAZIONE DI CALCOLO RILEVATI 2/3

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IA4S	01 D29	CL	GE0006 002	A	133 di 188

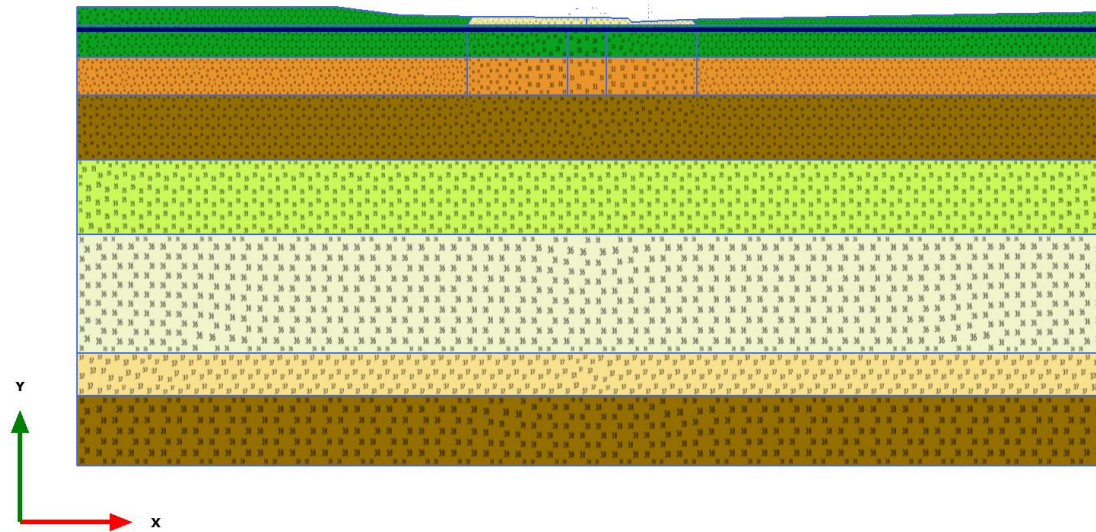
ALLEGATO C - RISULTATI ANALISI PLAXIS RIL. 2+700 CON INTERVENTI

1.1.1.1 Calculation results, Initial phase [InitialPhase] (0/0), Connectivity plot



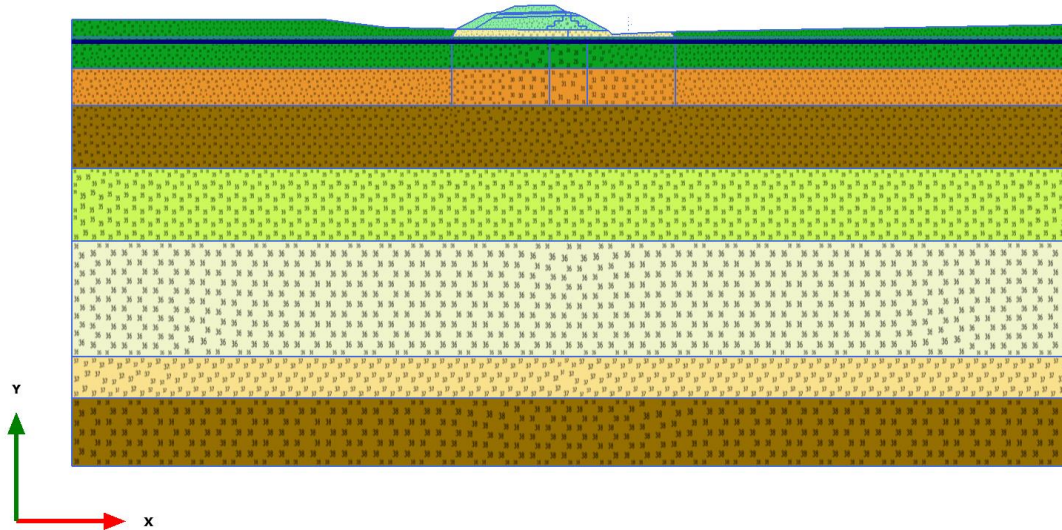
Connectivity plot

1.1.1.2 Calculation results, Cond. iniziale [Phase_1] (1/3), Connectivity plot



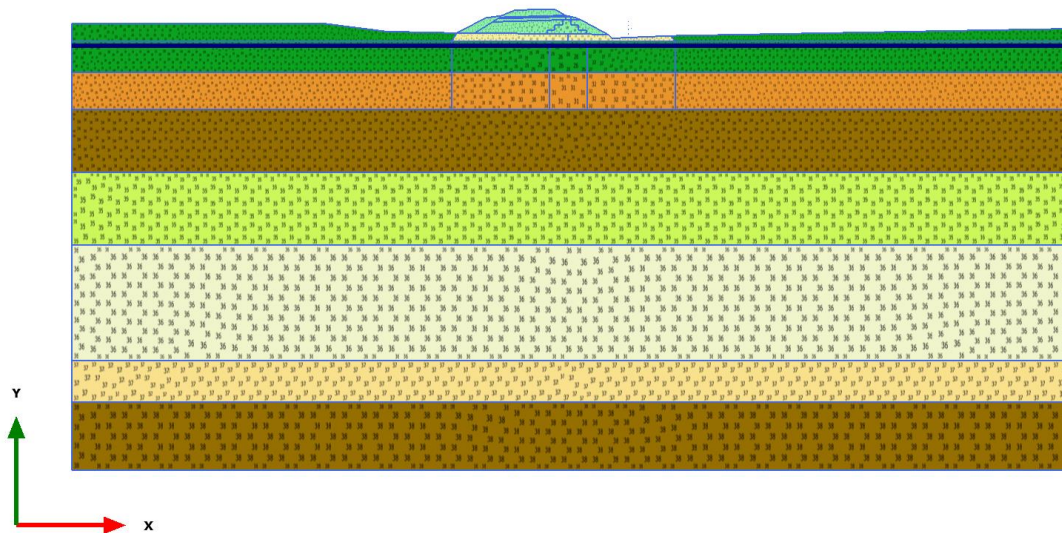
Connectivity plot

1.1.1.3 Calculation results, costr. ril. esistente [Phase_2] (2/12), Connectivity plot



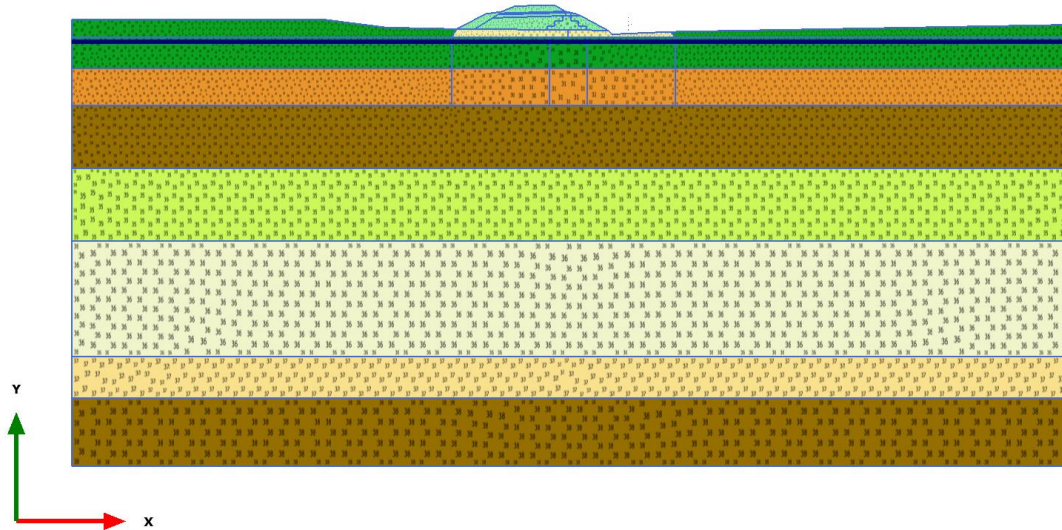
Connectivity plot

1.1.1.4 Calculation results, Esercizio rilevato esistente [Phase_4] (4/14), Connectivity plot



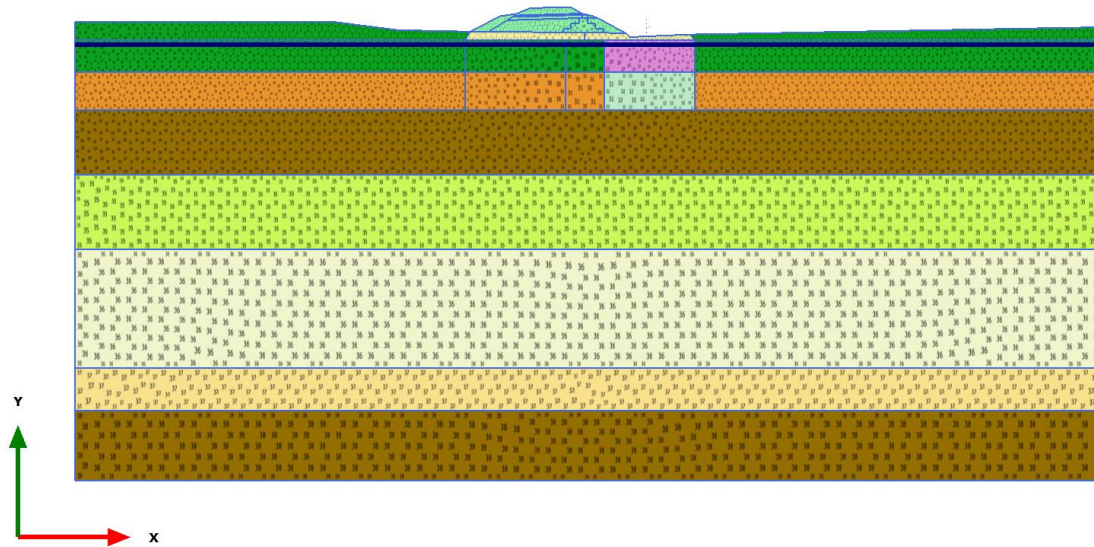
Connectivity plot

1.1.1.5 Calculation results, consolidaz. ril. esistente [Phase_3] (3/32), Connectivity plot



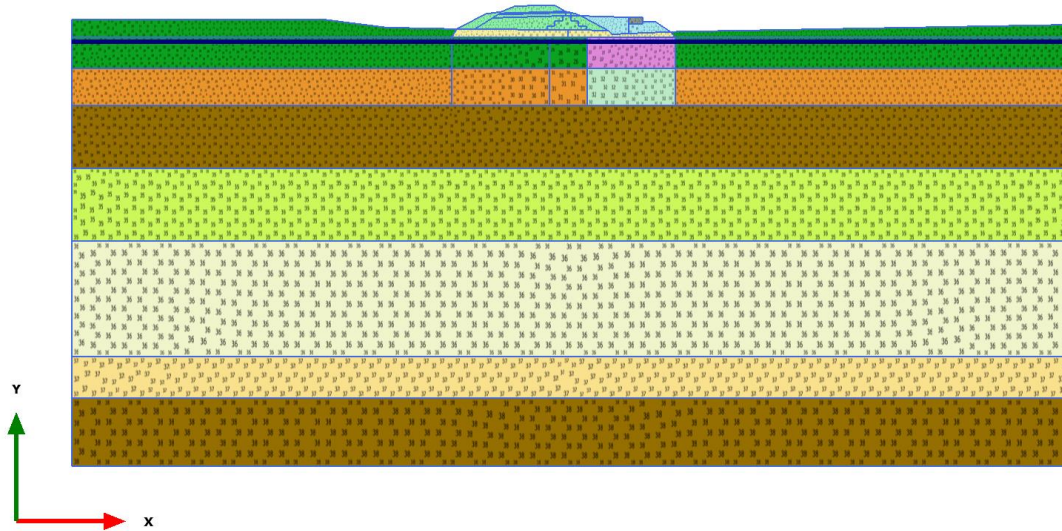
Connectivity plot

1.1.1.6 Calculation results, trattamento dx [Phase_5] (5/37), Connectivity plot



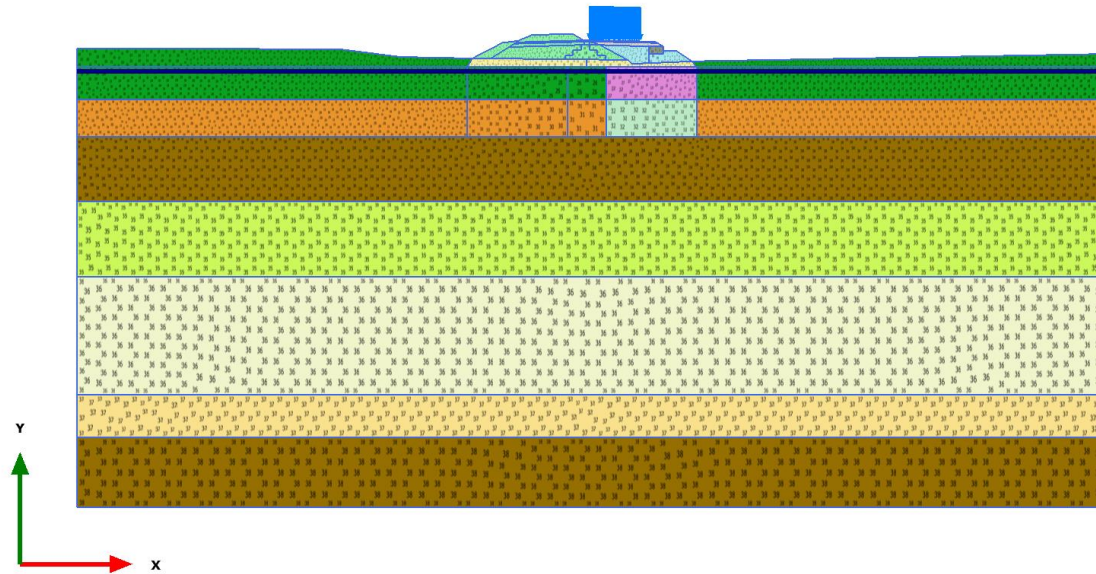
Connectivity plot

1.1.1.7 Calculation results, costruz. rilevato dx [Phase_7] (7/44), Connectivity plot



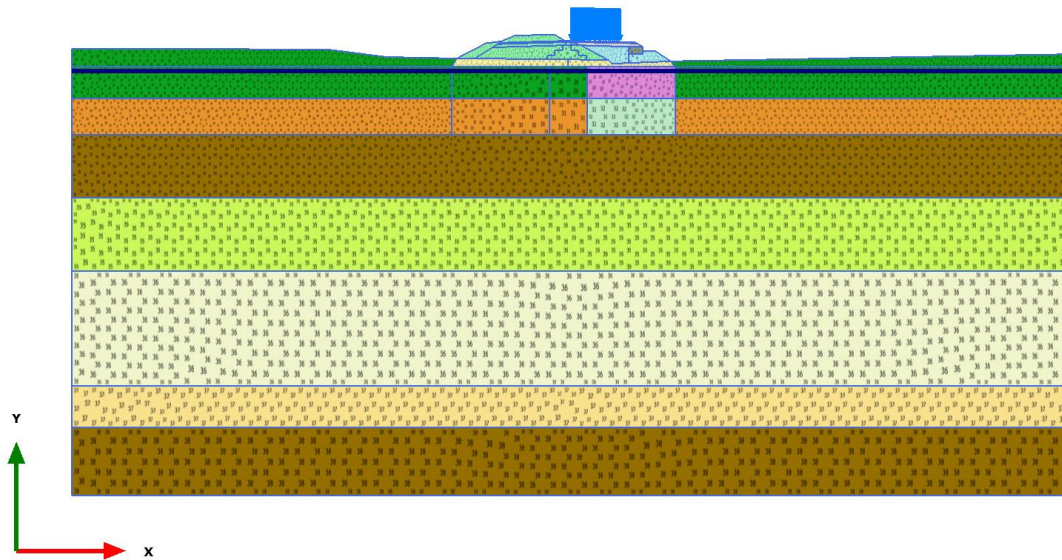
Connectivity plot

1.1.1.8 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/54), Connectivity plot



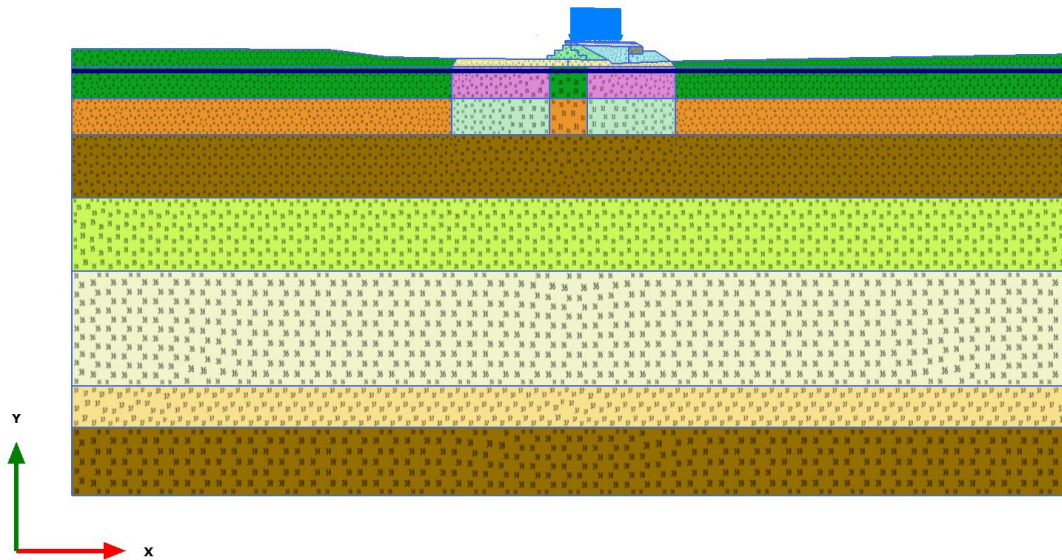
Connectivity plot

1.1.1.9 Calculation results, esercizio nuova linea [Phase_14] (14/58), Connectivity plot



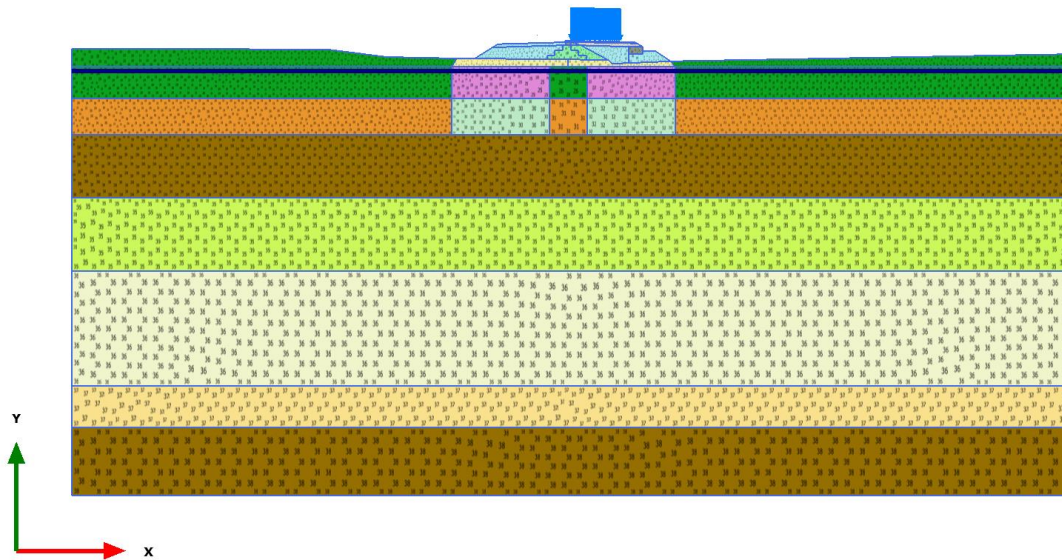
Connectivity plot

1.1.1.10 Calculation results, scavo rilevato sx [Phase_9] (9/64), Connectivity plot



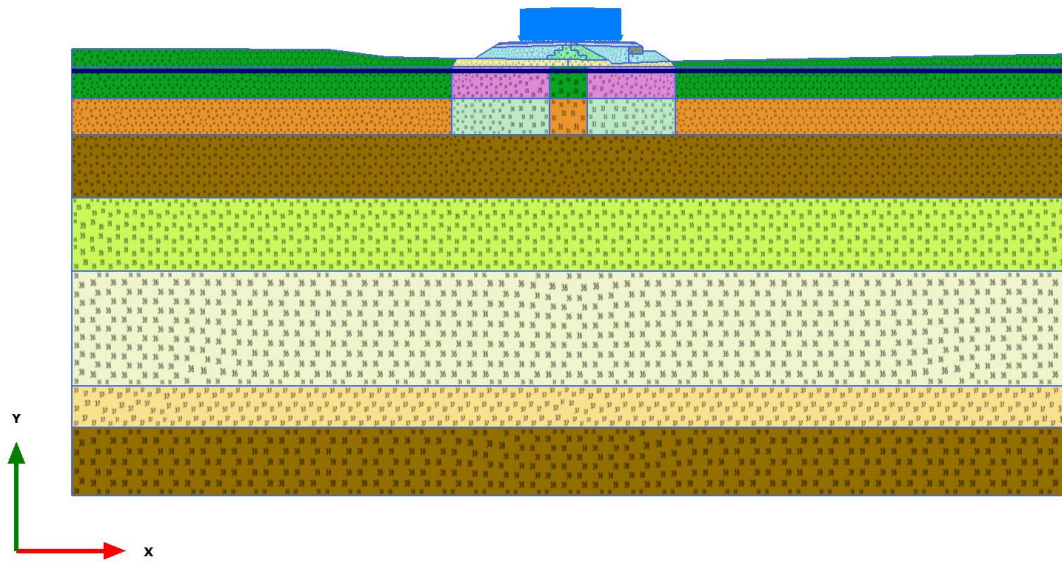
Connectivity plot

1.1.1.11 Calculation results, costruz. rilevato sx [Phase_11] (11/78), Connectivity plot



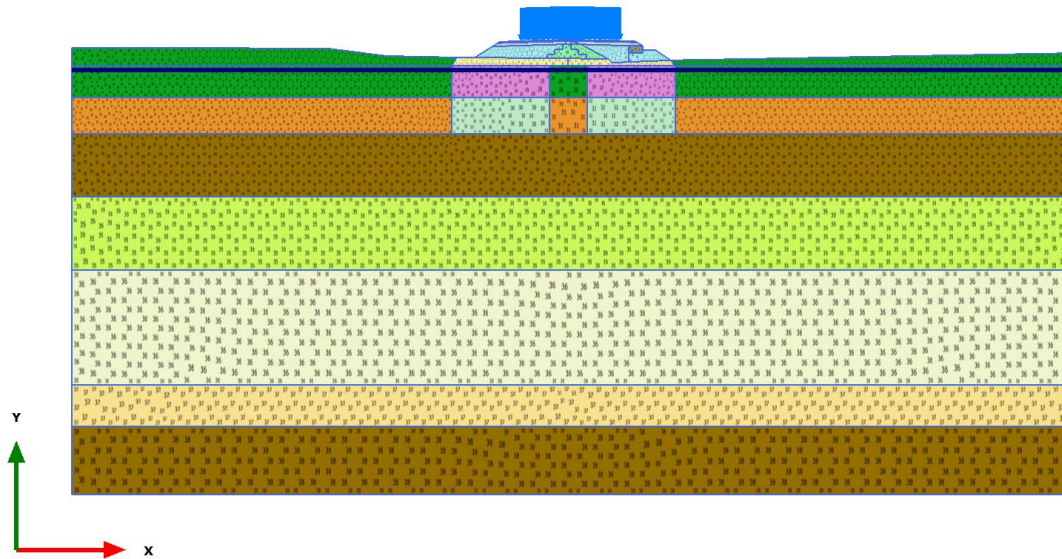
Connectivity plot

1.1.1.12 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/87), Connectivity plot



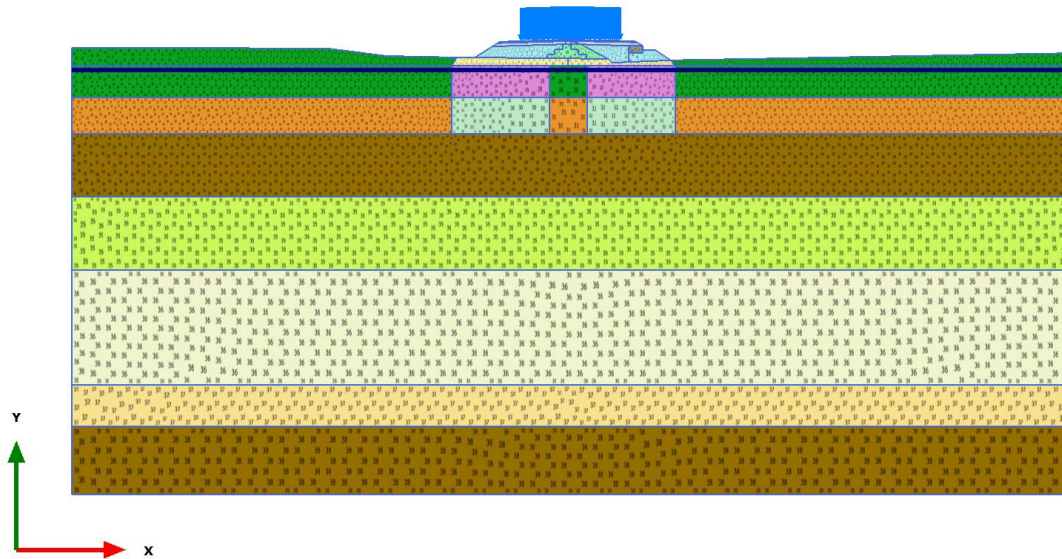
Connectivity plot

1.1.1.13 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/96), Connectivity plot



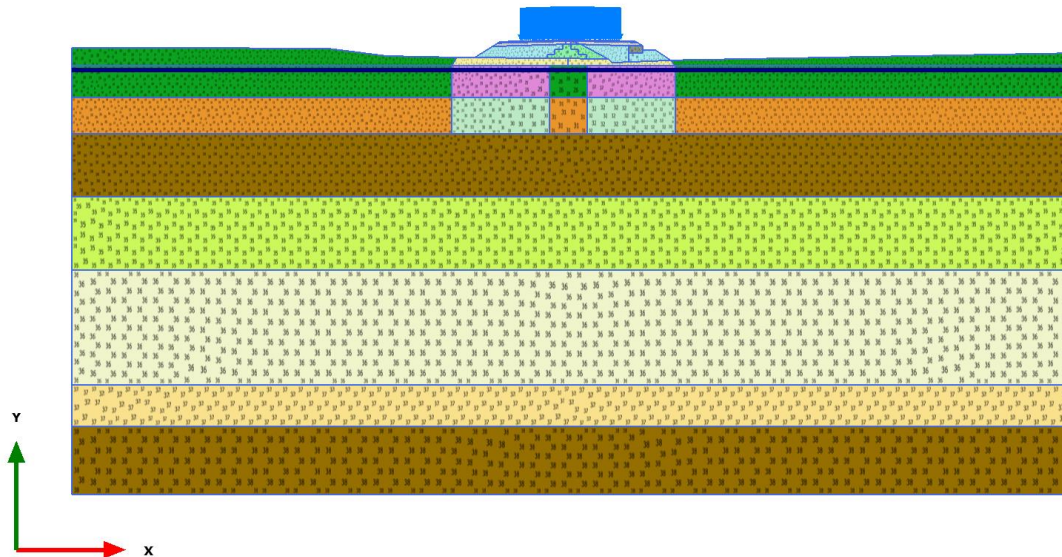
Connectivity plot

1.1.1.14 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (2 anni) [Phase_15] (15/105), Connectivity plot



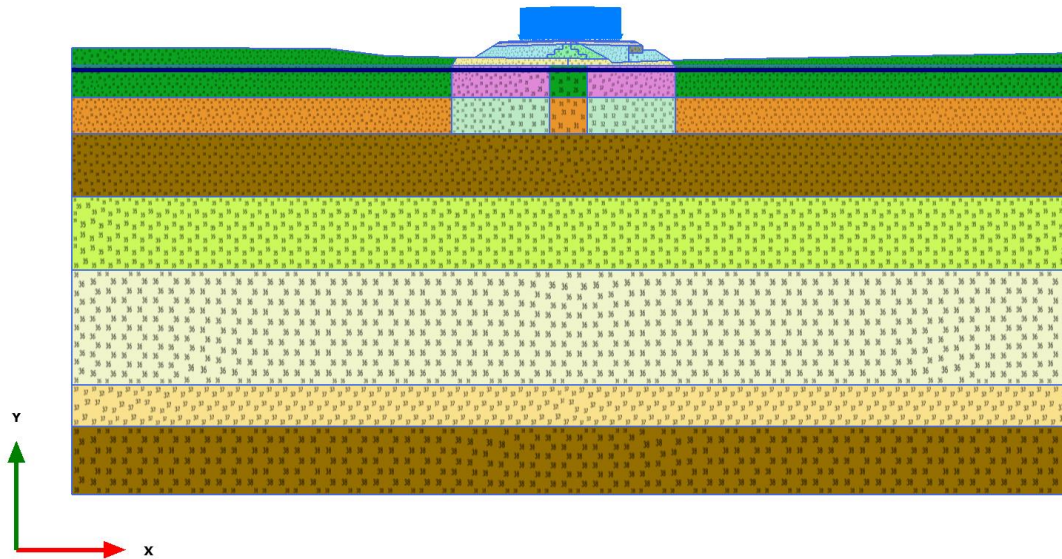
Connectivity plot

1.1.1.15 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (10 anni) [Phase_16] (16/117), Connectivity plot



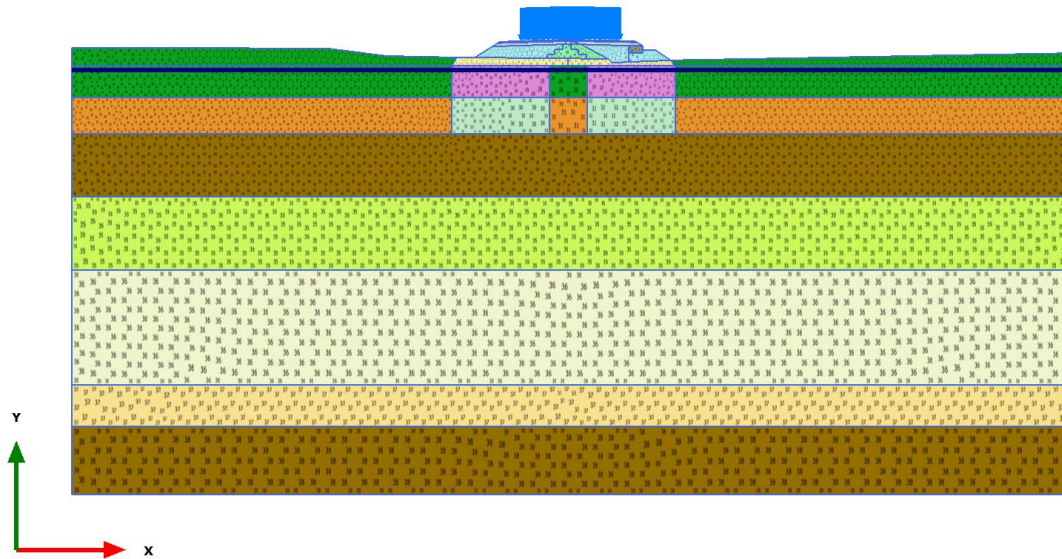
Connectivity plot

1.1.1.16 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (30 anni) [Phase_17] (17/129), Connectivity plot



Connectivity plot

1.1.1.17 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/141), Connectivity plot



Connectivity plot

1.1.2.1.1 Materials - Soil and interfaces - Soft soil

Identification		L,A2	A,L2	L,A1	M	A,L1 NEW
Identification number		1	2	3	5	11
Drainage type		Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)	Undrained (A)
Colour						
Comments						
γ_{unsat}	kN/m ³	19.00	17.50	18.50	21.00	18.00
γ_{sat}	kN/m ³	19.00	17.50	18.50	21.00	18.00
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0.8500	1.000	1.000	0.5500	0.8000
e_{min}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
e_{max}		999.0	999.0	999.0	999.0	999.0
Rayleigh α		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rayleigh β		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
λ^* (lambda*)		0.06580	0.06087	0.08043	0.04348	0.06522
κ^* (kappa*)		0.01457	0.01478	0.03478	0.01459	8.696E-3
Use alternatives		No	No	No	No	No
C_c		0.2800	0.2800	0.3700	0.1550	0.2700
C_s		0.03100	0.03400	0.08000	0.02600	0.01800

Identification		L,A2	A,L2	L,A1	M	A,L1 NEW
e _{init}		0.8500	1.000	1.000	0.5500	0.8000
c _{ref}	kN/m ²	0.000	5.000	12.00	20.00	10.00
φ (phi)	°	27.00	20.50	23.50	26.00	22.00
ψ (psi)	°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
v _{ur}		0.1500	0.1500	0.1500	0.1500	0.1500
K ₀ ^{nc}		0.5460	0.6498	0.6013	0.5616	0.6254
M		1.440	1.146	1.165	1.333	1.264
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0.9890	0.9890	0.9890	0.9890	0.9890
v _u		0.4950	0.4950	0.4950	0.4950	0.4950
K _{w,ref} / n	kN/m ²	617.7E3	608.8E3	258.7E3	617.0E3	1.035E6
Tension cut-off		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Strength		Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
R _{inter}		0.6600	0.6600	0.6600	0.6600	0.6600
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
δ _{inter}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable

Identification		L,A2	A,L2	L,A1	M	A,L1 NEW
Drainage conductivity, dk	m ³ /day/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K ₀ determination		Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic
K _{0,x} = K _{0,z}		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
K _{0,x}		0.6199	0.9338	0.6437	0.5809	1.164
K _{0,z}		0.6199	0.9338	0.6437	0.5809	1.164
OCR		1.200	1.600	1.100	1.050	2.200
POP	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Data set		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Type		Fine	Fine	Fine	Fine	Coarse
< 2 µm	%	46.00	46.00	46.00	46.00	10.00
2 µm - 50 µm	%	26.00	26.00	26.00	26.00	13.00
50 µm - 2 mm	%	28.00	28.00	28.00	28.00	77.00
Use defaults		None	None	None	None	None
k _x	m/day	0.08640	0.08640E-3	8.640E-3	0.08640E-3	0.08640E-3
k _y	m/day	0.08640	8.640E-6	8.640E-3	0.08640E-3	8.640E-6
-Ψ _{unsat}	m	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3
e _{init}		0.8500	1.000	1.000	0.5500	0.8000
S _s	1/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C _k		1000E12	1000E12	1000E12	1000E12	1000E12

1.1.2.1.2 Materials - Soil and interfaces - Mohr-Coulomb

Identification		G,S	rilevato	BONIFICO	Trattamento1	trattamento2
Identification number		4	7	12	15	16
Drainage type		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
Colour						
Comments						
γ_{unsat}	kN/m ³	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
γ_{sat}	kN/m ³	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
e_{min}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
e_{max}		999.0	999.0	999.0	999.0	999.0
Rayleigh α		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rayleigh β		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E	kN/m ²	50.00E3	30.00E3	15.00E3	18.80E3	8500
ν (nu)		0.2000	0.3000	0.3000	0.2000	0.2000
G	kN/m ²	20.83E3	11.54E3	5769	7833	3542
E_{oed}	kN/m ²	55.56E3	40.38E3	20.19E3	20.89E3	9444
c_{ref}	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	8.000	0.000
ϕ (phi)	°	36.00	38.00	32.00	26.20	35.60
ψ (psi)	°	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Identification		G,S	rilevato	BONIFICO	Trattamento1	trattamento2
V_s	m/s	103.7	77.18	54.58	63.60	42.76
V_p	m/s	169.4	144.4	102.1	103.9	69.83
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
γ_{ref}	m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C_{inc}	kN/m ² /m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
γ_{ref}	m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Tension cut-off		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Tensile strength	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0.9866	0.9783	0.9783	0.9866	0.9866
v_u		0.4950	0.4950	0.4950	0.4950	0.4950
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	2.049E6	1.125E6	562.5E3	770.3E3	348.3E3
Strength		Manual	Manual	Manual	Rigid	Manual
R_{inter}		0.6600	0.6600	0.6600	1.000	0.6600
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
$\bar{\sigma}_{inter}$		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity, dk	m ³ /day/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0.4122	0.3843	0.4701	0.5585	0.4179

Identification		G,S	rilevato	BONIFICO	Trattamento1	trattamento2
$K_{0,z}$		0.4122	0.3843	0.4701	0.5585	0.4179
OCR		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
POP	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Data set		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Type		Coarse	Medium	Coarse	Coarse	Coarse
< 2 μm	%	10.00	19.00	10.00	10.00	10.00
2 μm - 50 μm	%	13.00	41.00	13.00	13.00	13.00
50 μm - 2 mm	%	77.00	40.00	77.00	77.00	77.00
Use defaults		None	From data set	None	None	None
k_x	m/day	8.640	0.1206	0.08640	0.8640	8.640
k_y	m/day	8.640	0.1206	0.08640	0.8640	8.640
$-\psi_{\text{unsat}}$	m	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3
e_{init}		0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
S_s	1/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C_k		1000E12	1000E12	1000E12	1000E12	1000E12

1.1.2.1.3 Materials - Soil and interfaces - Linear elastic

Identification		supercompattato	sub-ballast	cls	Rilevato esistente	pali
Identification number		6	8	9	10	13
Drainage type		Drained	Drained	Non-porous	Drained	Non-porous
Colour						
Comments						
γ_{unsat}	kN/m ³	20.00	20.00	25.00	19.00	25.00
γ_{sat}	kN/m ³	20.00	20.00	25.00	19.00	25.00
Dilatancy cut-off		No	No	No	No	No
e_{init}		0.5000	0.5000	0.000	0.5000	0.000
e_{min}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
e_{max}		999.0	999.0	999.0	999.0	999.0
Rayleigh α		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Rayleigh β		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
E	kN/m ²	60.00E3	460.0E3	25.00E6	30.00E3	4.909E6
ν (nu)		0.3000	0.3000	0.1000	0.3000	0.1000
G	kN/m ²	23.08E3	176.9E3	11.36E6	11.54E3	2.231E6
E_{oed}	kN/m ²	80.77E3	619.2E3	25.57E6	40.38E3	5.020E6
V_s	m/s	106.4	294.6	2112	77.18	935.7
V_p	m/s	199.0	551.1	3167	144.4	1404

Identification		supercompattato	sub-ballast	cls	Rilevato esistente	pali
Set to default values		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
E_{inc}	kN/m ² /m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Y_{ref}	m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Undrained behaviour		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Skempton-B		0.9783	0.9783	0.9908	0.9783	0.9908
V_u		0.4950	0.4950	0.4950	0.4950	0.4950
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	2.250E6	17.25E6	1.122E9	1.125E6	220.3E6
Strength		Manual	Manual	Manual	Manual	Manual
R_{inter}		0.1000	0.1000	0.1000	0.6600	0.6600
Consider gap closure		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
δ_{inter}		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cross permeability		Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable	Impermeable
Drainage conductivity, dk	m ³ /day/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K_0 determination		Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
$K_{0,x}$		0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
$K_{0,z}$		0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000
OCR		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
POP	kN/m ²	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Data set		Standard	Standard	Standard	Standard	Standard
Type		Medium fine	Coarse	Coarse	Medium	Coarse

Identification		supercompattato	sub-ballast	cls	Rilevato esistente	pali
< 2 μm	%	19.00	10.00	10.00	19.00	10.00
2 μm - 50 μm	%	74.00	13.00	13.00	41.00	13.00
50 μm - 2 mm	%	7.000	77.00	77.00	40.00	77.00
Use defaults		None	None	None	From data set	None
k_x	m/day	0.08640E-3	0.000	0.000	0.1206	0.000
k_y	m/day	0.08640E-3	0.000	0.000	0.1206	0.000
$-\psi_{\text{unsat}}$	m	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3	10.00E3
e_{init}		0.5000	0.5000	0.000	0.5000	0.000
S_s	1/m	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C_k		1000E12	1000E12	1000E12	1000E12	1000E12

1.1.2.1.4 Materials - Soil and interfaces - Hardening soil

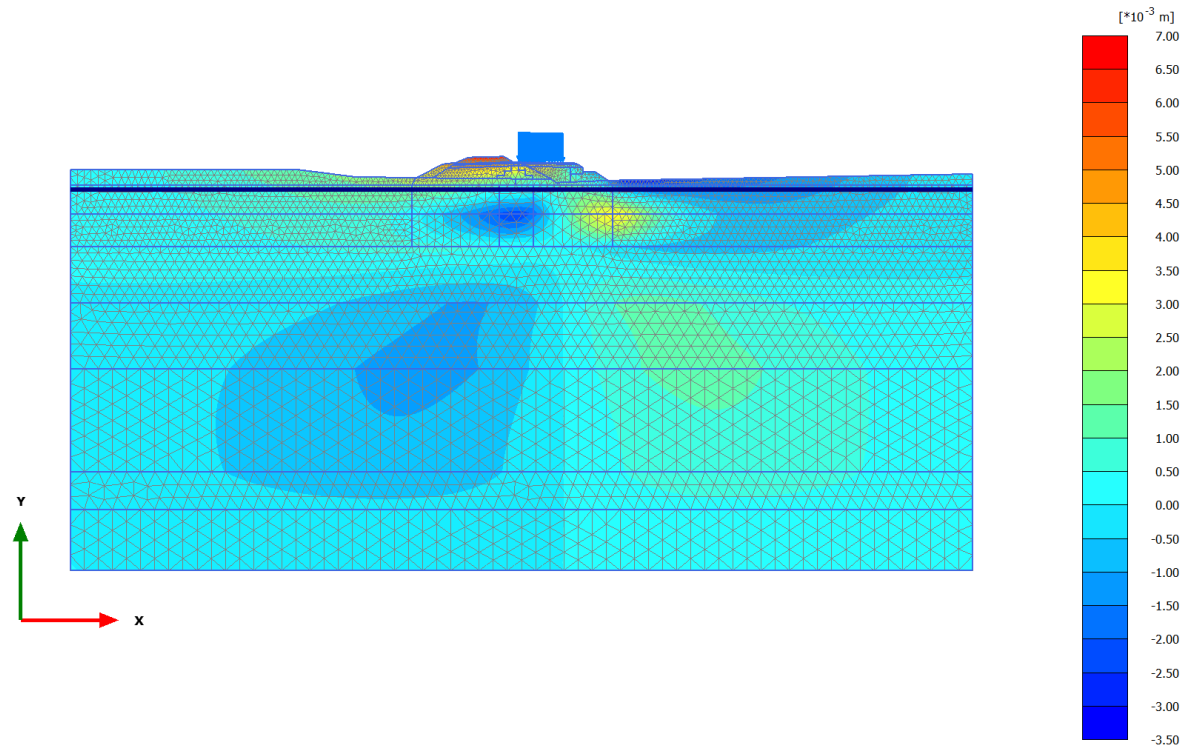
Identification			L(S)
Identification number			14
Drainage type			Drained
Colour			
Comments			
γ_{unsat}	kN/m ³		19.00
γ_{sat}	kN/m ³		19.00
Dilatancy cut-off			No
e_{init}			0.5000
e_{min}			0.000
e_{max}			999.0
Rayleigh α			0.000
Rayleigh β			0.000
E_{50}^{ref}	kN/m ²		4500
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	kN/m ²		4500
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	kN/m ²		9000
power (m)			0.5000
Use alternatives			No

Identification		L(S)
C_c		0.07667
C_s		0.03450
e_{init}		0.5000
C_{ref}	kN/m ²	0.000
ϕ (phi)	°	30.00
ψ (psi)	°	0.000
Set to default values		Yes
v_{ur}		0.2000
p_{ref}	kN/m ²	100.0
K_0^{nc}		0.5000
C_{inc}	kN/m ² /m	0.000
γ_{ref}	m	0.000
R_f		0.9000
Tension cut-off		Yes
Tensile strength	kN/m ²	0.000
Undrained behaviour		Standard
Skempton-B		0.9866
v_u		0.4950
$K_{w,ref} / n$	kN/m ²	368.7E3

Identification		L(S)
Strength		Manual
R_{inter}		0.6600
Consider gap closure		Yes
δ_{inter}		0.000
Cross permeability		Impermeable
Drainage conductivity, dk	m ³ /day/m	0.000
K_0 determination		Automatic
$K_{0,x} = K_{0,z}$		Yes
$K_{0,x}$		0.5000
$K_{0,z}$		0.5000
OCR		1.000
POP	kN/m ²	0.000
Data set		Standard
Type		Coarse
< 2 μ m	%	10.00
2 μ m - 50 μ m	%	13.00
50 μ m - 2 mm	%	77.00
Use defaults		None
k_x	m/day	0.08640

Identification		L(S)
k_y	m/day	0.08640
$-\psi_{\text{unsat}}$	m	10.00E3
e_{init}		0.5000
S_s	1/m	0.000
C_k		1000E12

2.1.1.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/54), Total displacements u_x

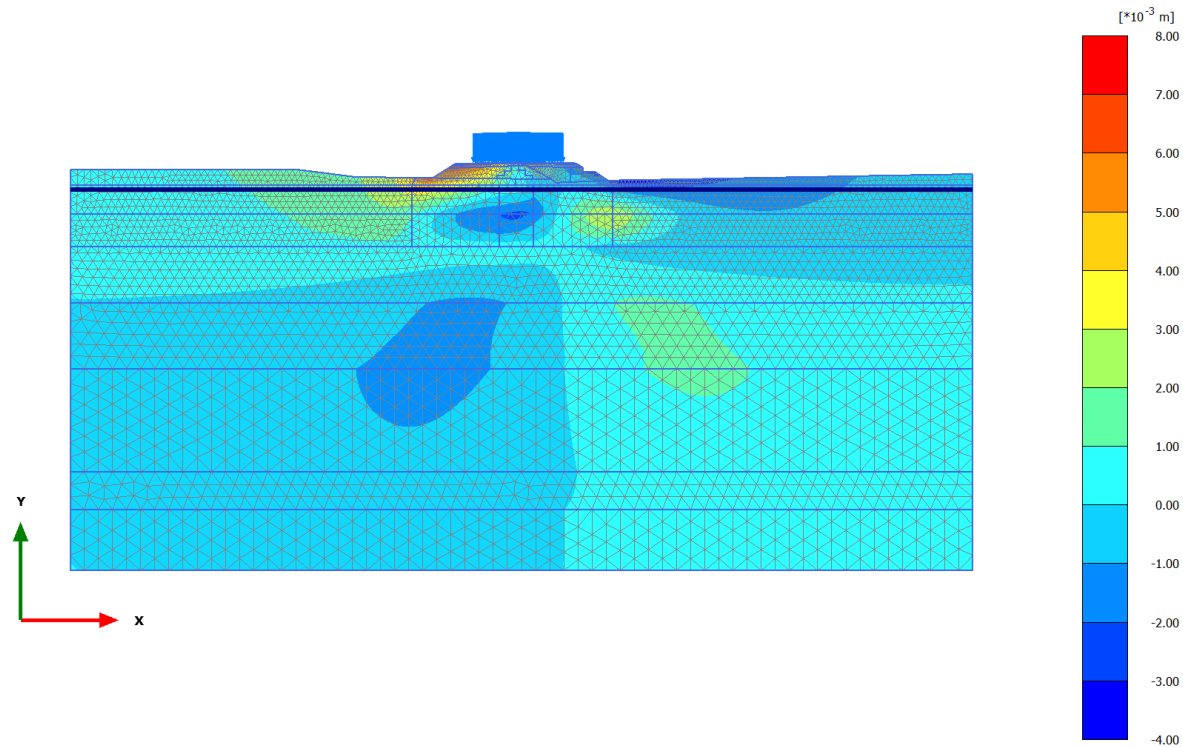


Total displacements u_x (scaled up 500 times) (Time 19.34*10³ day)

Maximum value = 6.594*10⁻³ m (Element 259 at Node 6429)

Minimum value = -3.112*10⁻³ m (Element 1495 at Node 3991)

2.1.1.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/87), Total displacements u_x

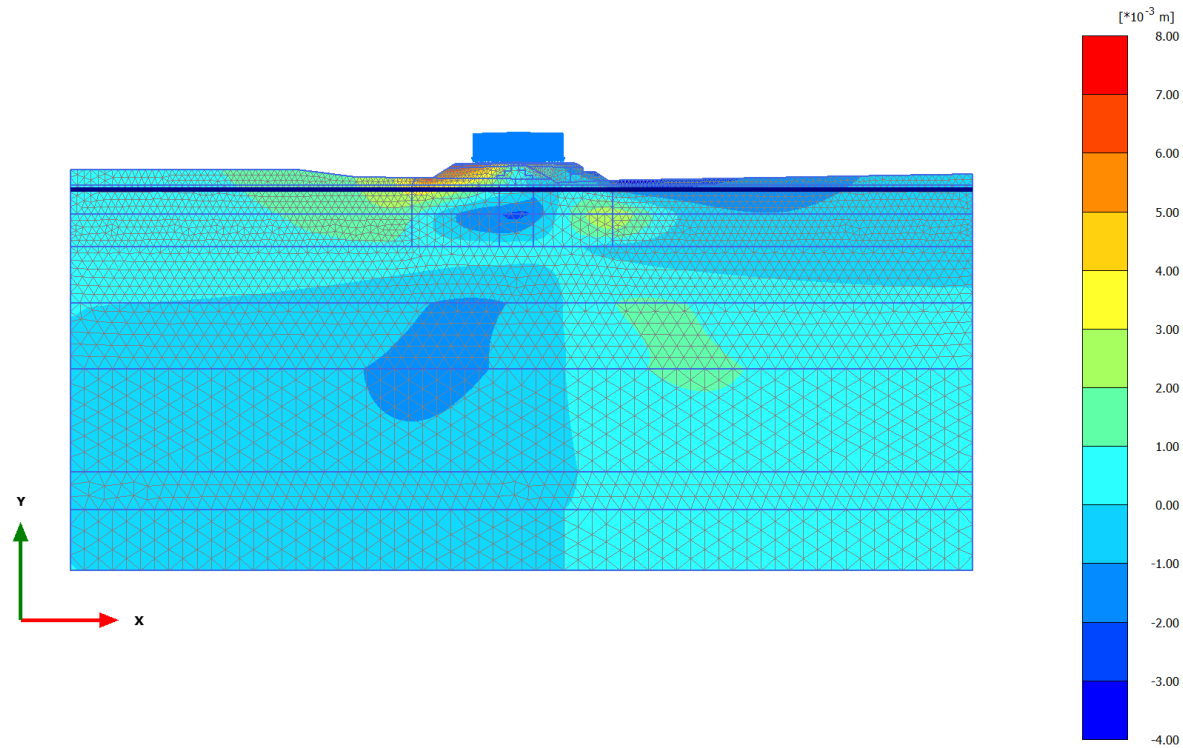


Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 19.67×10^3 day)

Maximum value = 7.754×10^{-3} m (Element 182 at Node 6526)

Minimum value = -3.657×10^{-3} m (Element 1504 at Node 4195)

2.1.1.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/96), Total displacements u_x

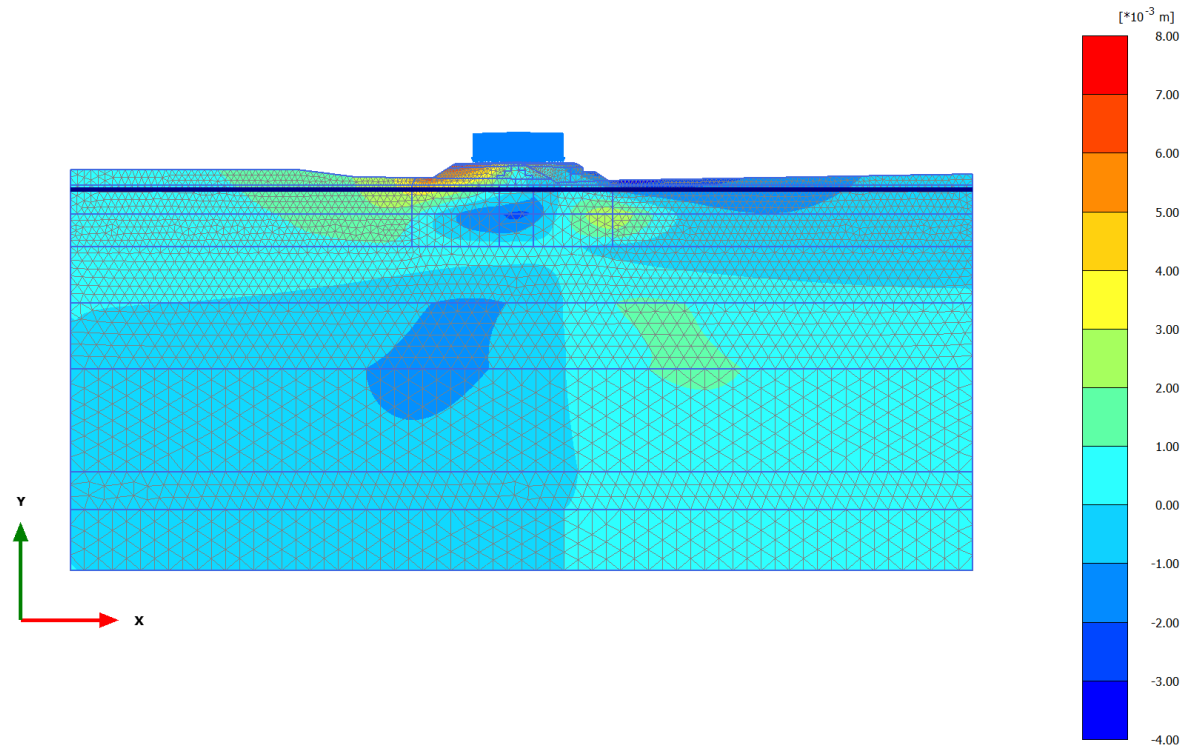


Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 20.04×10^3 day)

Maximum value = 7.771×10^{-3} m (Element 182 at Node 6526)

Minimum value = -3.683×10^{-3} m (Element 1499 at Node 4193)

2.1.1.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/141), Total displacements u_x

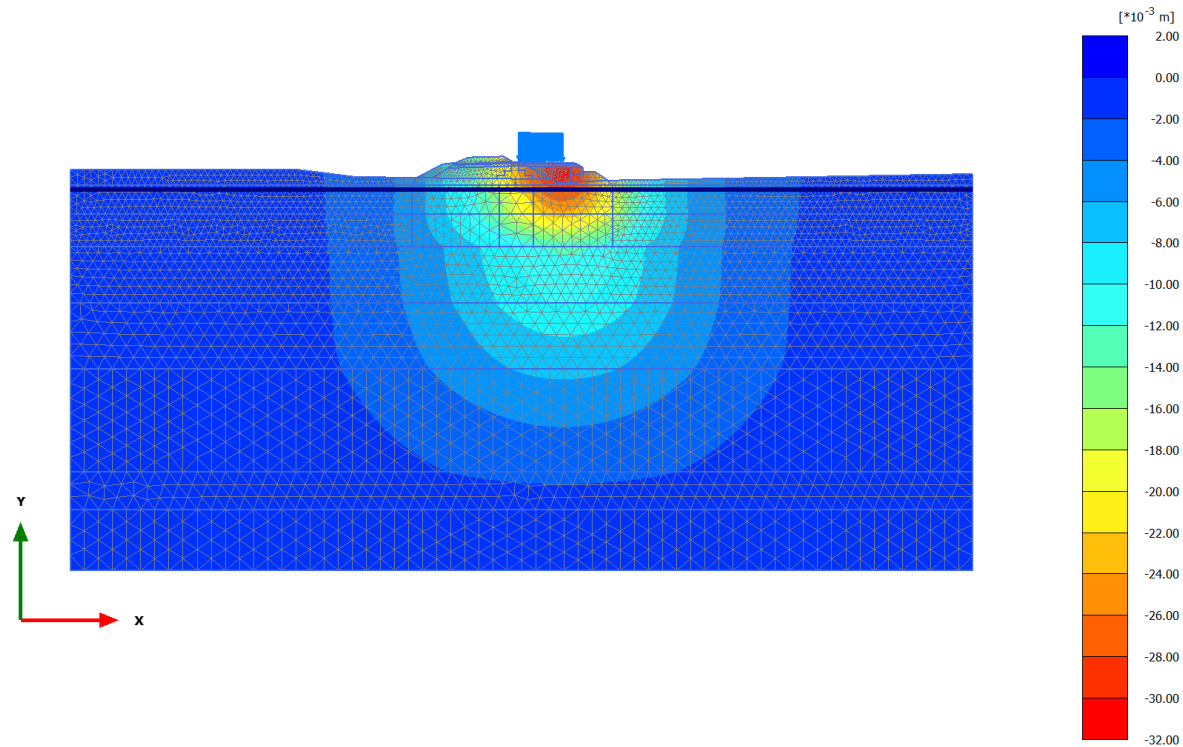


Total displacements u_x (scaled up 200 times) (Time 47.04×10^3 day)

Maximum value = 7.775×10^{-3} m (Element 182 at Node 6526)

Minimum value = -3.689×10^{-3} m (Element 1499 at Node 4193)

2.1.1.2.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/54), Total displacements u_y

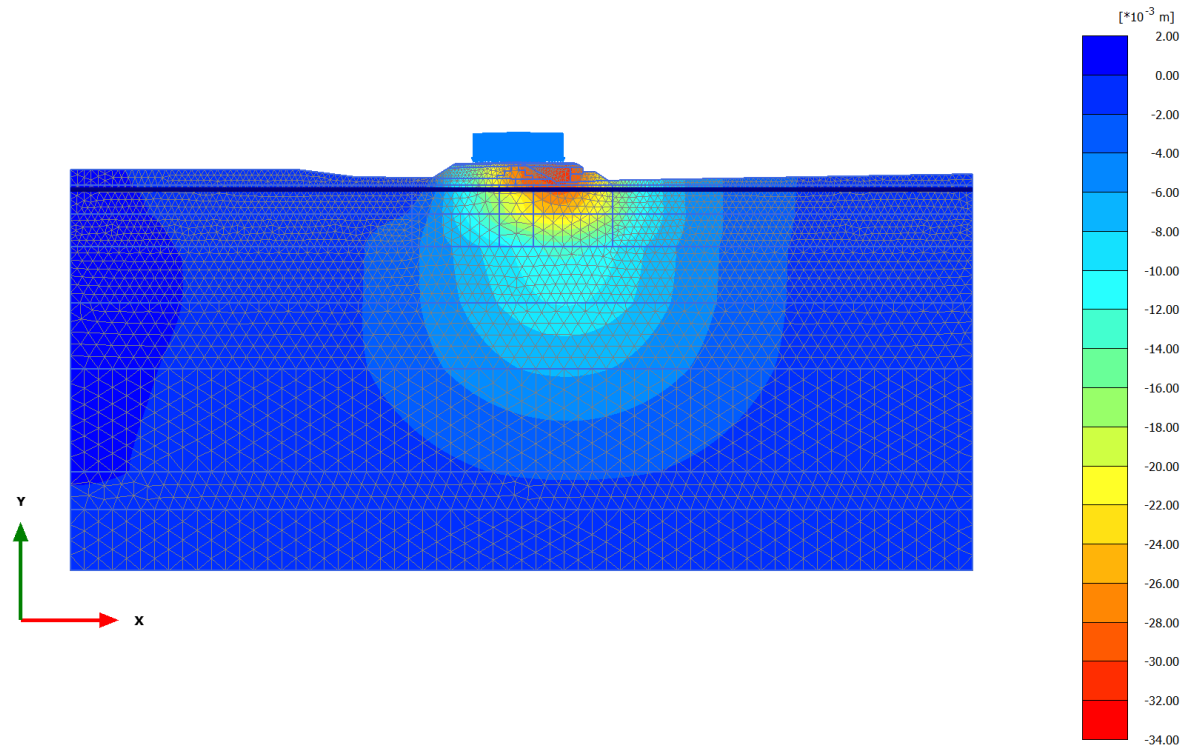


Total displacements u_y (scaled up 100 times) (Time 19.34×10^3 day)

Maximum value = 0.000 m (Element 7188 at Node 1229)

Minimum value = -0.03101 m (Element 832 at Node 5580)

2.1.1.2.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/87), Total displacements u_y

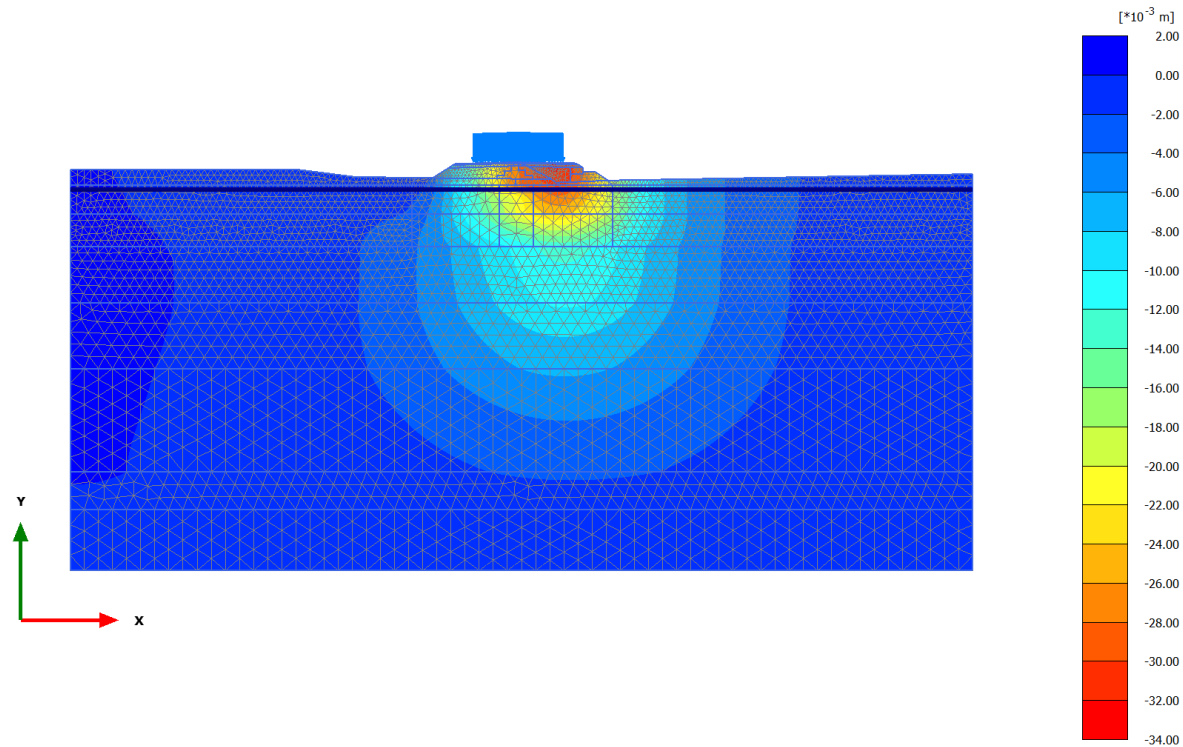


Total displacements u_y (scaled up 50.0 times) (Time 19.67×10^3 day)

Maximum value = 0.1685×10^{-3} m (Element 4829 at Node 14988)

Minimum value = -0.03200 m (Element 852 at Node 5624)

2.1.1.2.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/96), Total displacements u_y

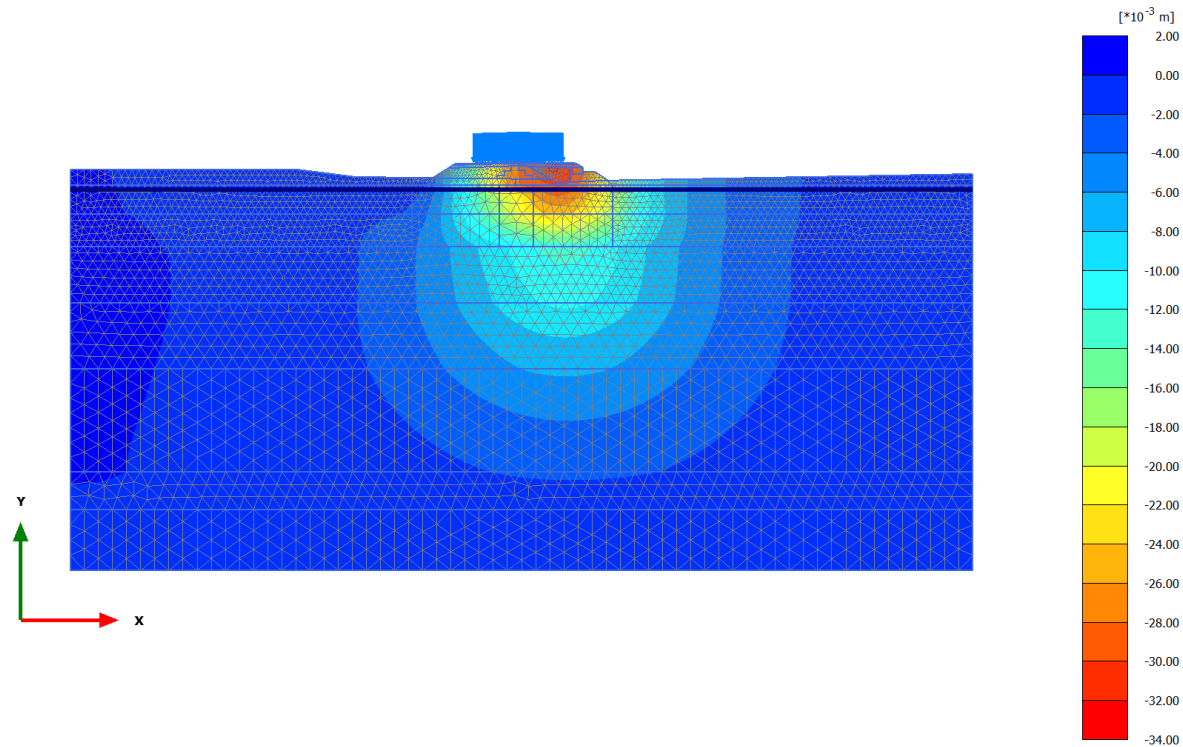


Total displacements u_y (scaled up 50.0 times) (Time 20.04×10^3 day)

Maximum value = 0.1450×10^{-3} m (Element 4593 at Node 14986)

Minimum value = -0.03218 m (Element 852 at Node 5624)

2.1.1.2.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/141), Total displacements u_y

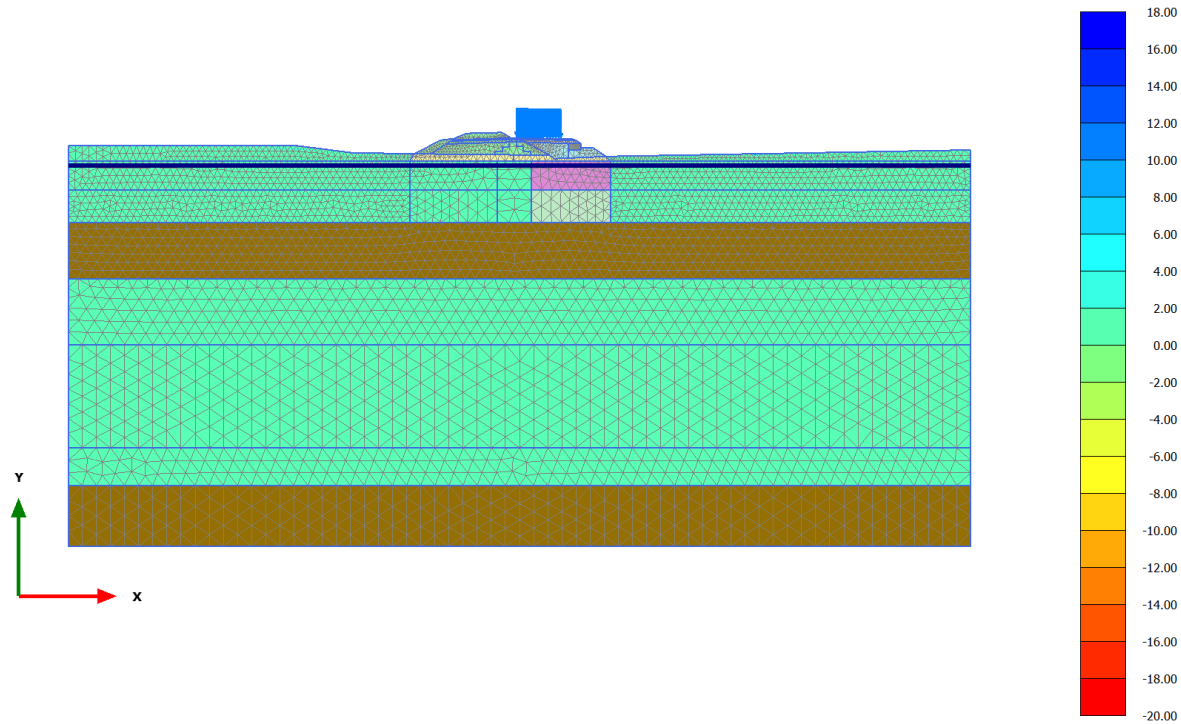


Total displacements u_y (scaled up 50.0 times) (Time 47.04* 10^3 day)

Maximum value = 0.1374* 10^{-3} m (Element 4593 at Node 14900)

Minimum value = -0.03223 m (Element 852 at Node 5624)

2.2.1.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/54), Isotropic overconsolidation ratio

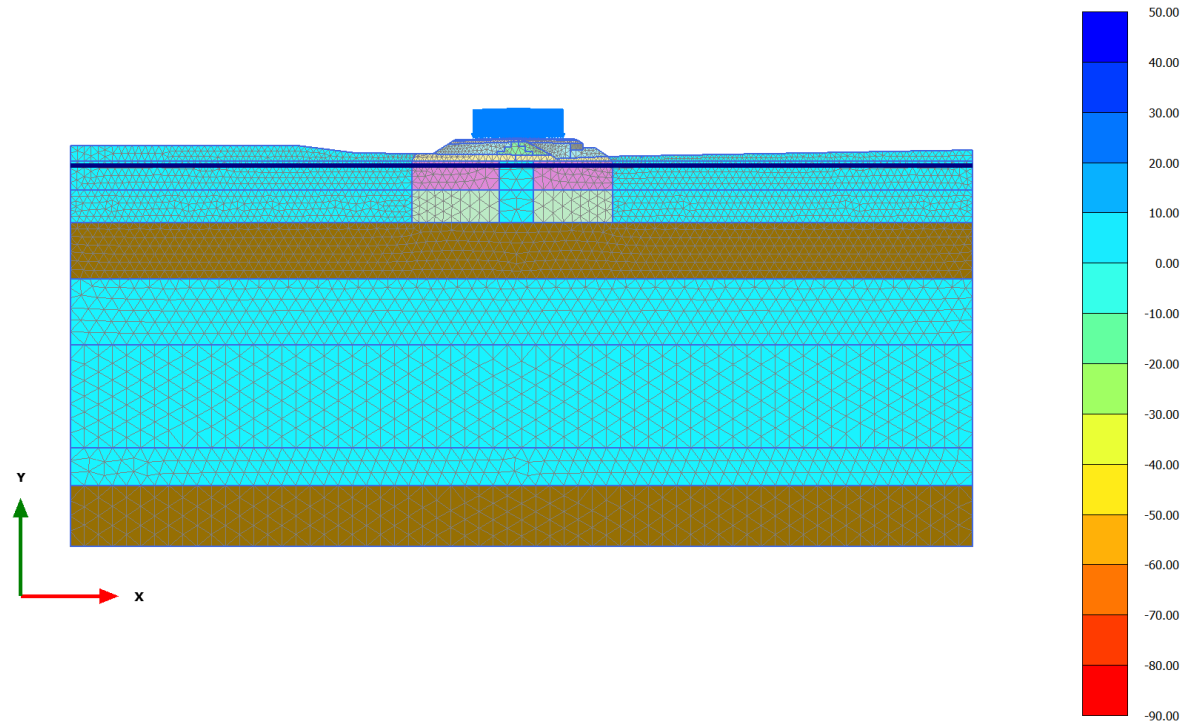


Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0500 times) (Time 19.34×10^3 day)

Maximum value = 17.31 (Element 1402 at Node 1593)

Minimum value = -18.44 (Element 1402 at Node 1595)

2.2.1.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/87), Isotropic overconsolidation ratio

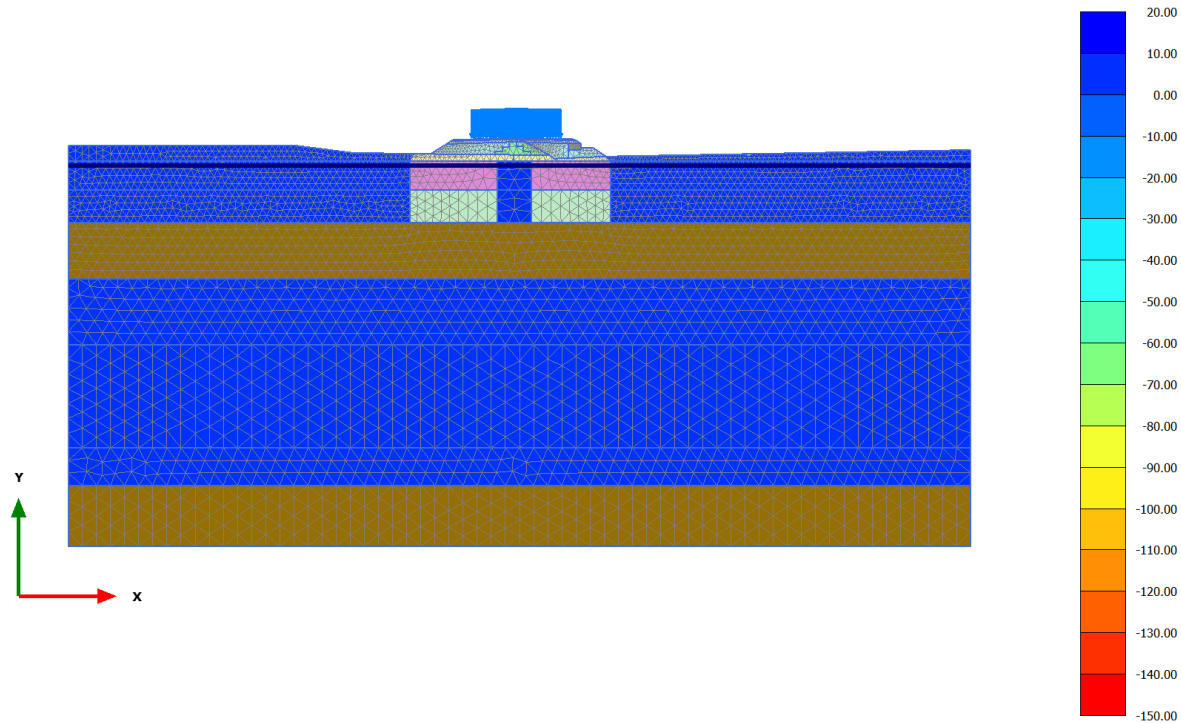


Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0200 times) (Time 19.67×10^3 day)

Maximum value = 41.30 (Element 1496 at Node 3794)

Minimum value = -89.52 (Element 1477 at Node 2922)

2.2.1.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/96), Isotropic overconsolidation ratio

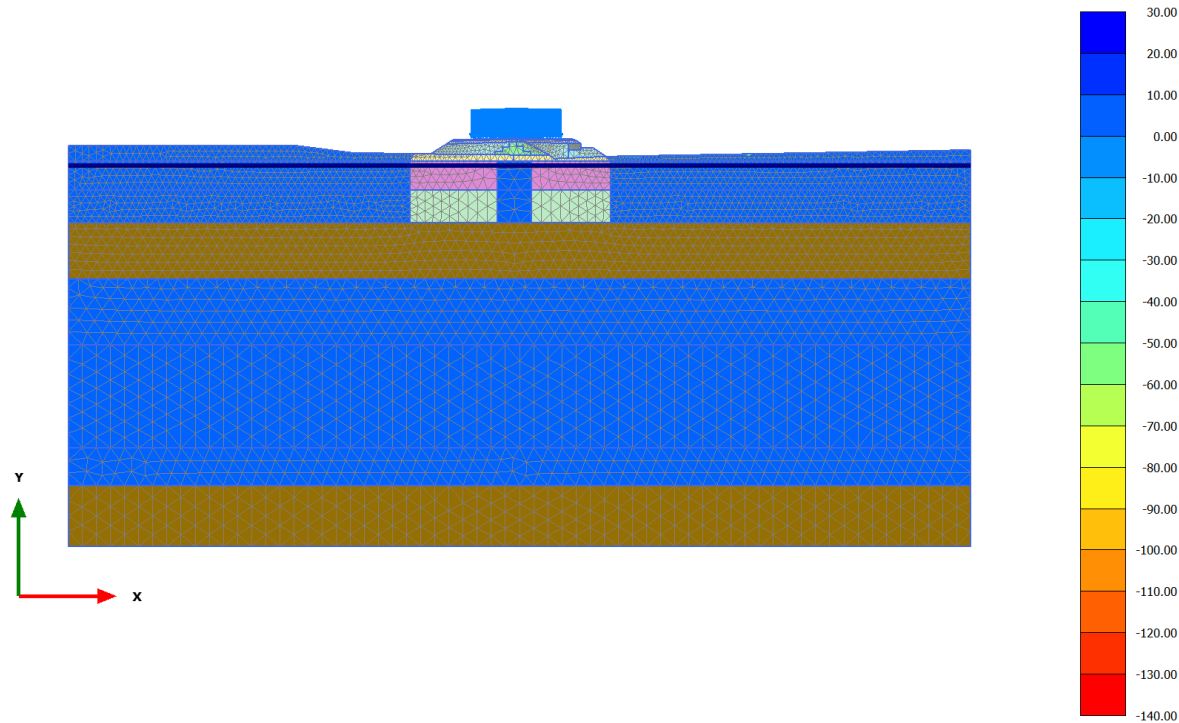


Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0200 times) (Time 20.04×10^3 day)

Maximum value = 13.48 (Element 1484 at Node 3394)

Minimum value = -141.5 (Element 1408 at Node 1597)

2.2.1.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/141), Isotropic overconsolidation ratio

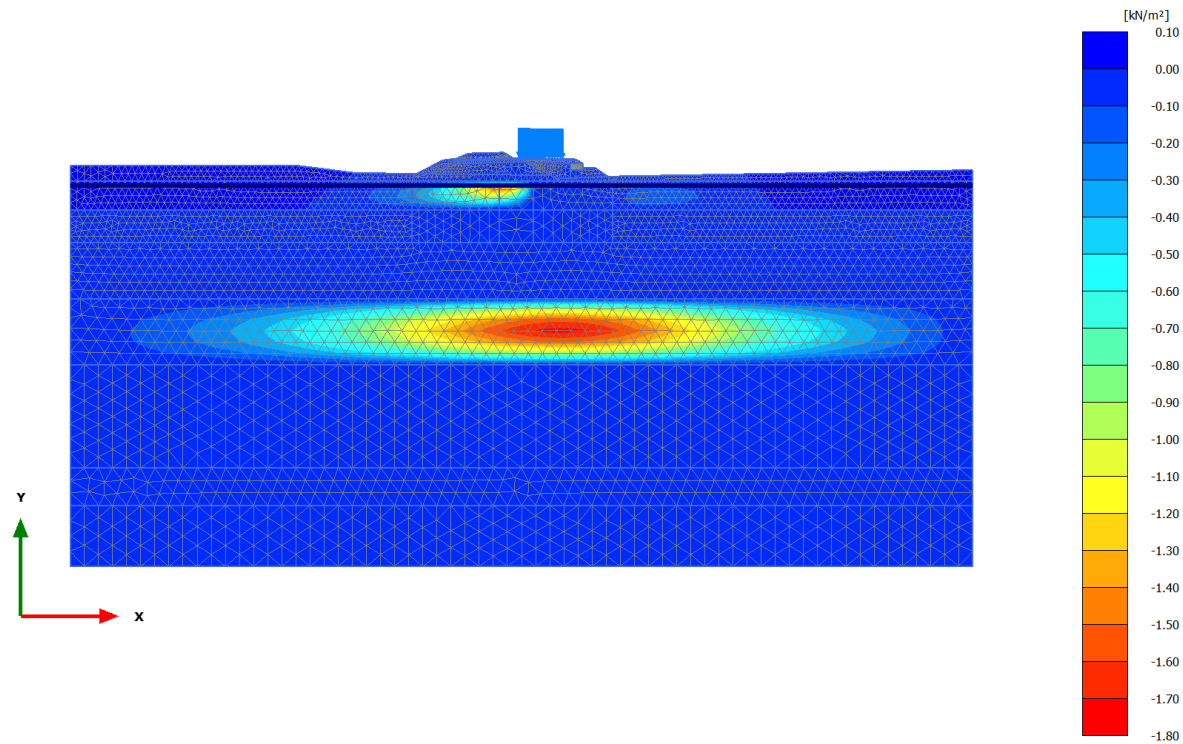


Isotropic overconsolidation ratio (scaled up 0.0200 times) (Time 47.04×10^3 day)

Maximum value = 21.17 (Element 1494 at Node 3790)

Minimum value = -138.3 (Element 1408 at Node 1597)

2.2.2.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/54), Excess pore pressures p_{excess}

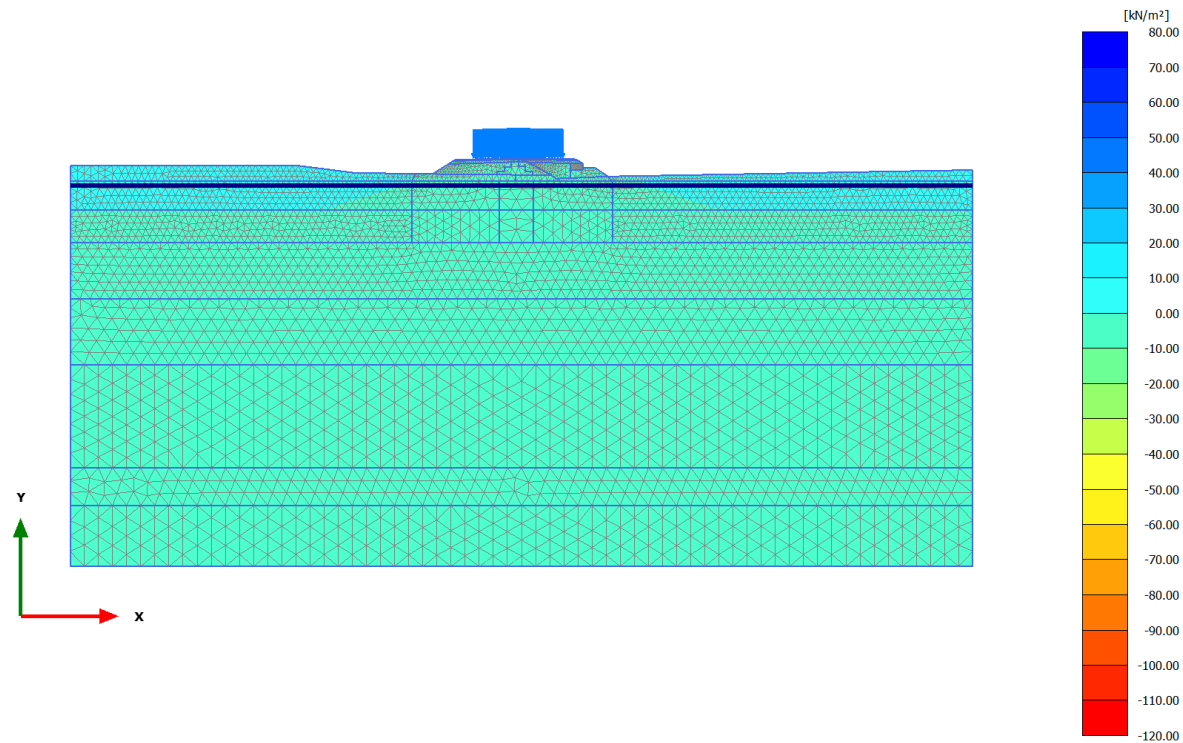


Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 5.00 times) (Pressure = negative) (Time $19.34 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 0.08825 kN/m² (Element 1917 at Node 14463)

Minimum value = -1.743 kN/m² (Element 5484 at Node 9044)

2.2.2.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/87), Excess pore pressures p_{excess}

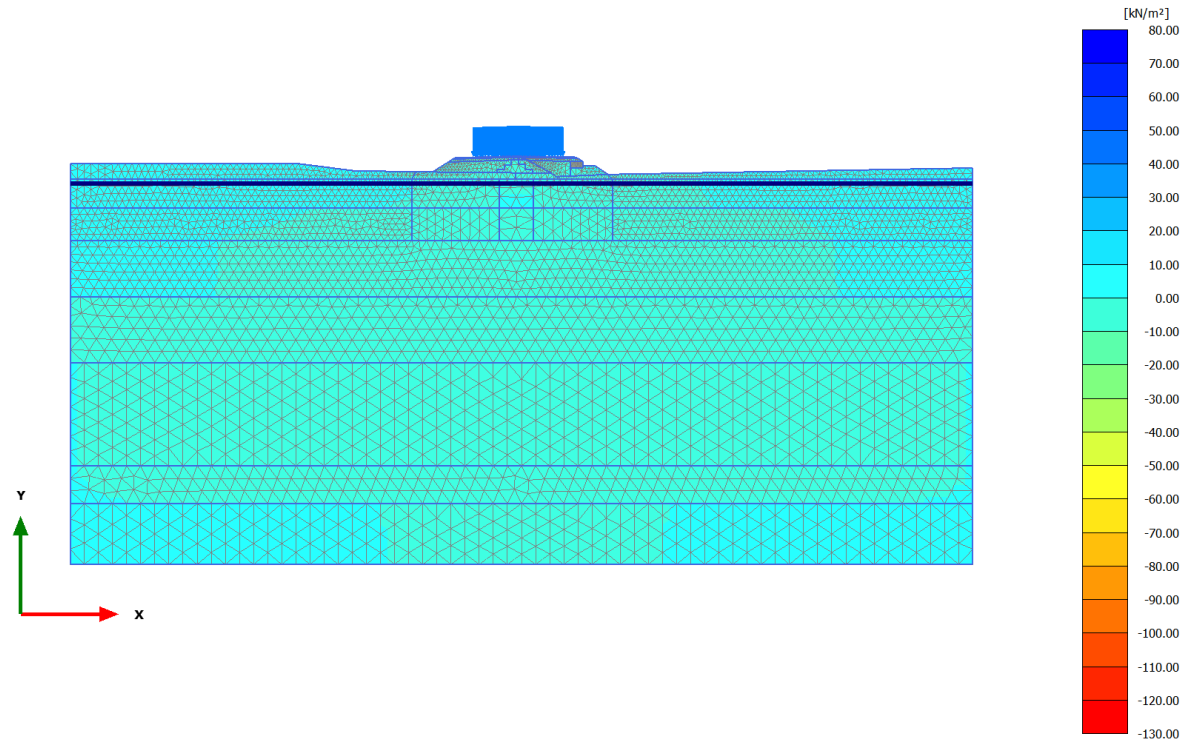


Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 0.0200 times) (Pressure = negative) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 74.70 kN/m² (Element 128 at Node 6949)

Minimum value = -116.4 kN/m² (Element 45 at Node 6964)

2.2.2.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/96), Excess pore pressures p_{excess}

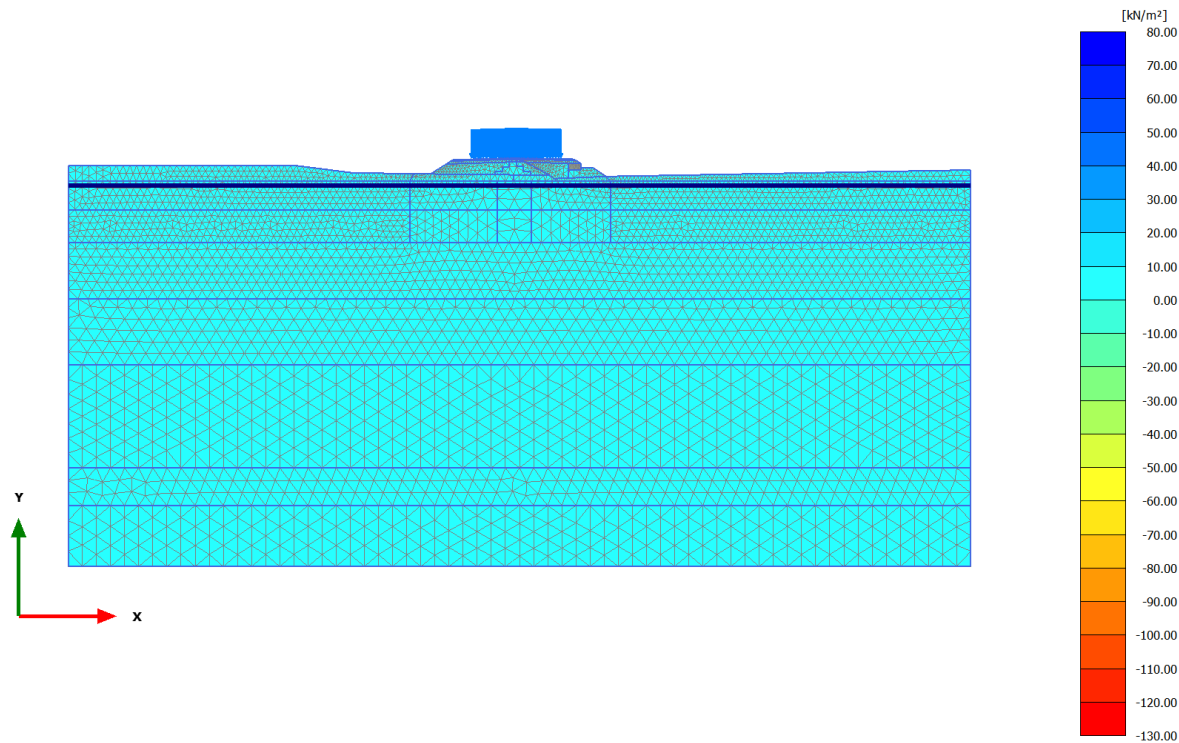


Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 0.0200 times) (Pressure = negative) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 70.53 kN/m² (Element 128 at Node 6949)

Minimum value = -121.8 kN/m² (Element 45 at Node 6964)

2.2.2.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/141), Excess pore pressures p_{excess}

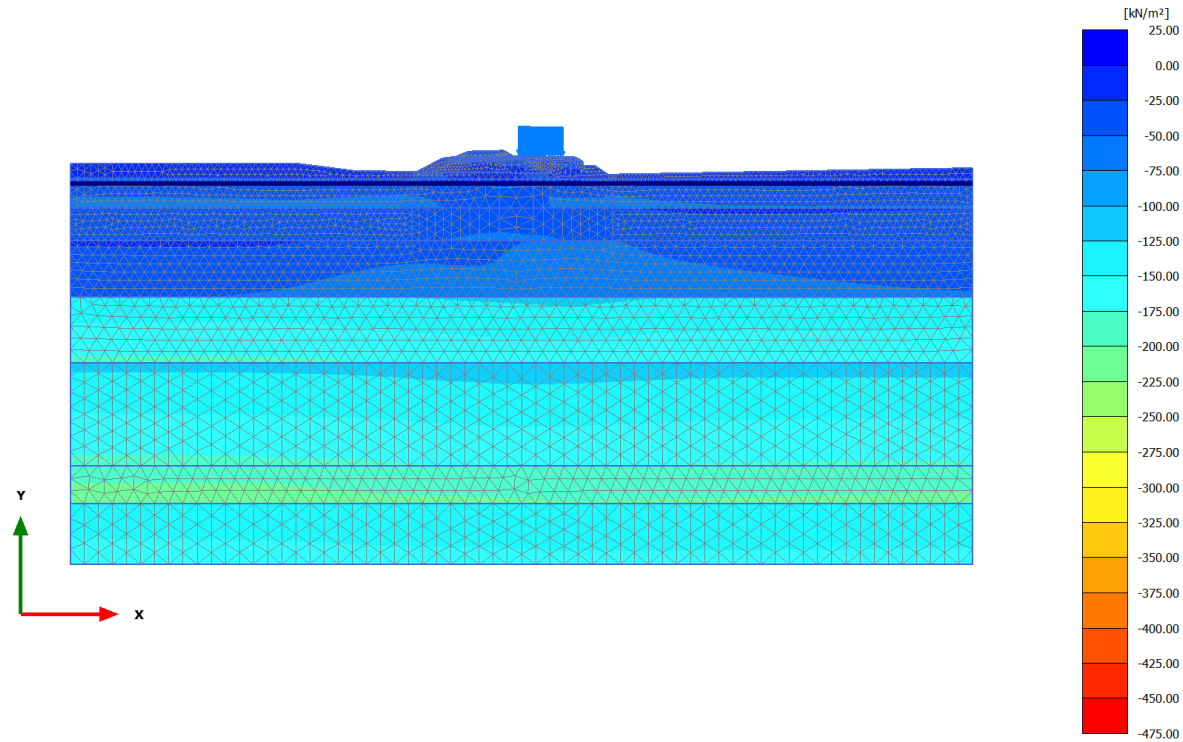


Excess pore pressures p_{excess} (scaled up 0.0200 times) (Pressure = negative) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 70.11 kN/m² (Element 128 at Node 6949)

Minimum value = -122.4 kN/m² (Element 45 at Node 6964)

2.2.3.1.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/54), Cartesian effective stress σ'_{xx}

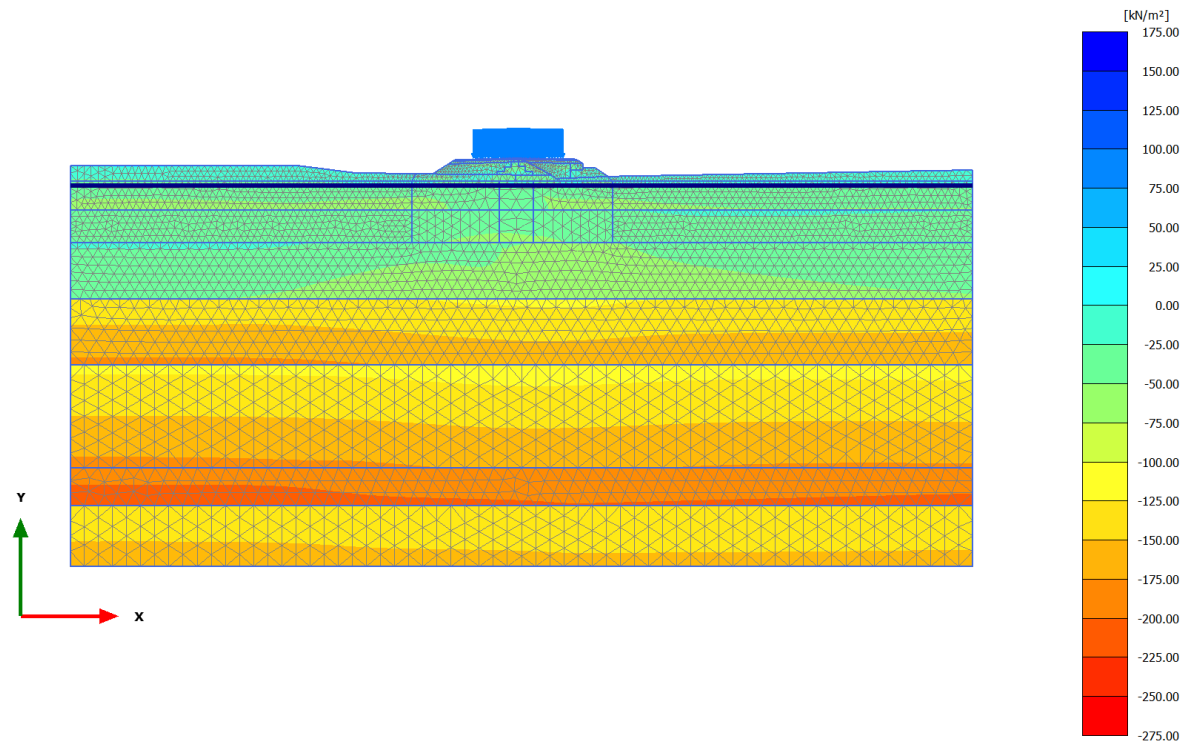


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $19.34 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 9.594 kN/m² (Element 63 at Node 5108)

Minimum value = -454.5 kN/m² (Element 3 at Node 6397)

2.2.3.1.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/87), Cartesian effective stress σ'_{xx}

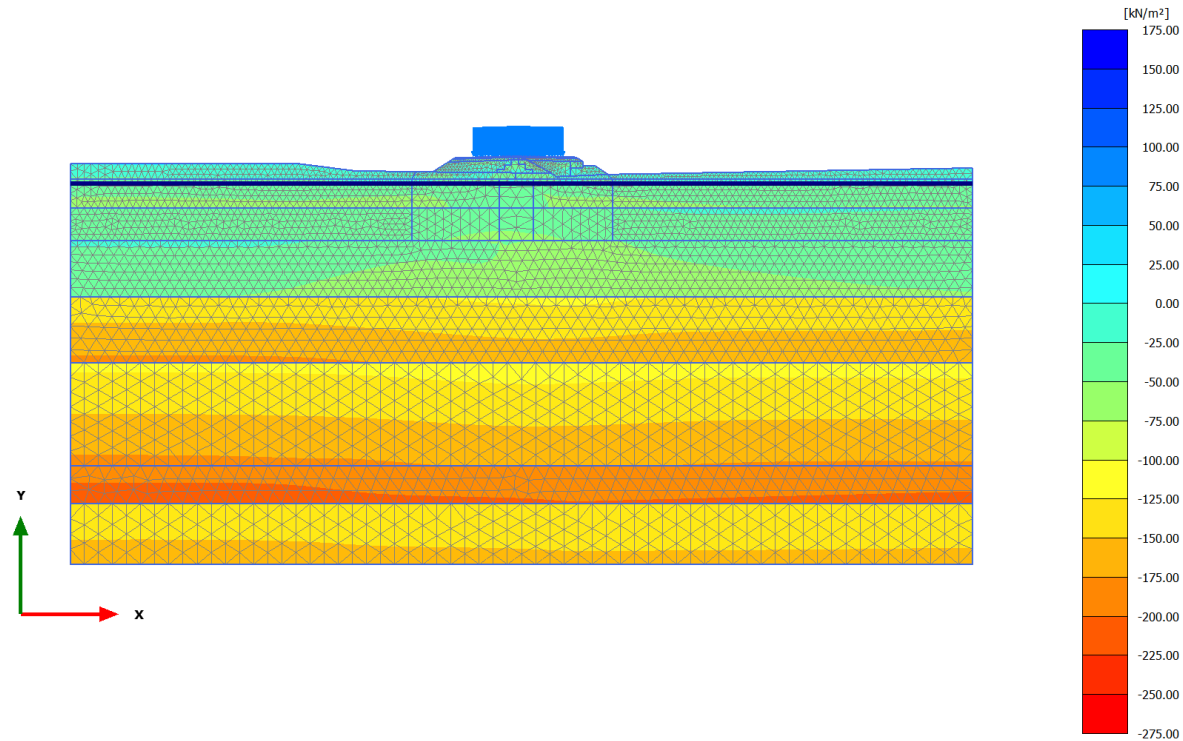


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 167.5 kN/m² (Element 2 at Node 6350)

Minimum value = -257.1 kN/m² (Element 18 at Node 6315)

2.2.3.1.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/96), Cartesian effective stress σ'_{xx}

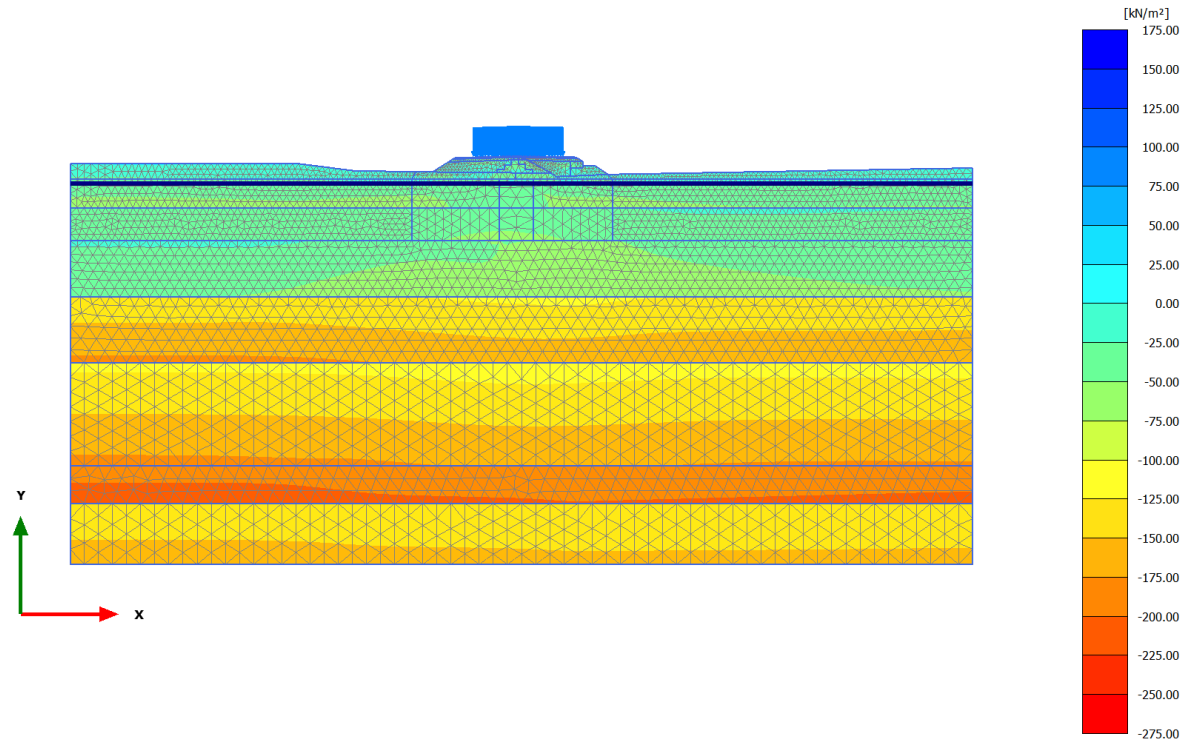


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 161.6 kN/m² (Element 2 at Node 6350)

Minimum value = -262.8 kN/m² (Element 18 at Node 6315)

2.2.3.1.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/141), Cartesian effective stress σ'_{xx}

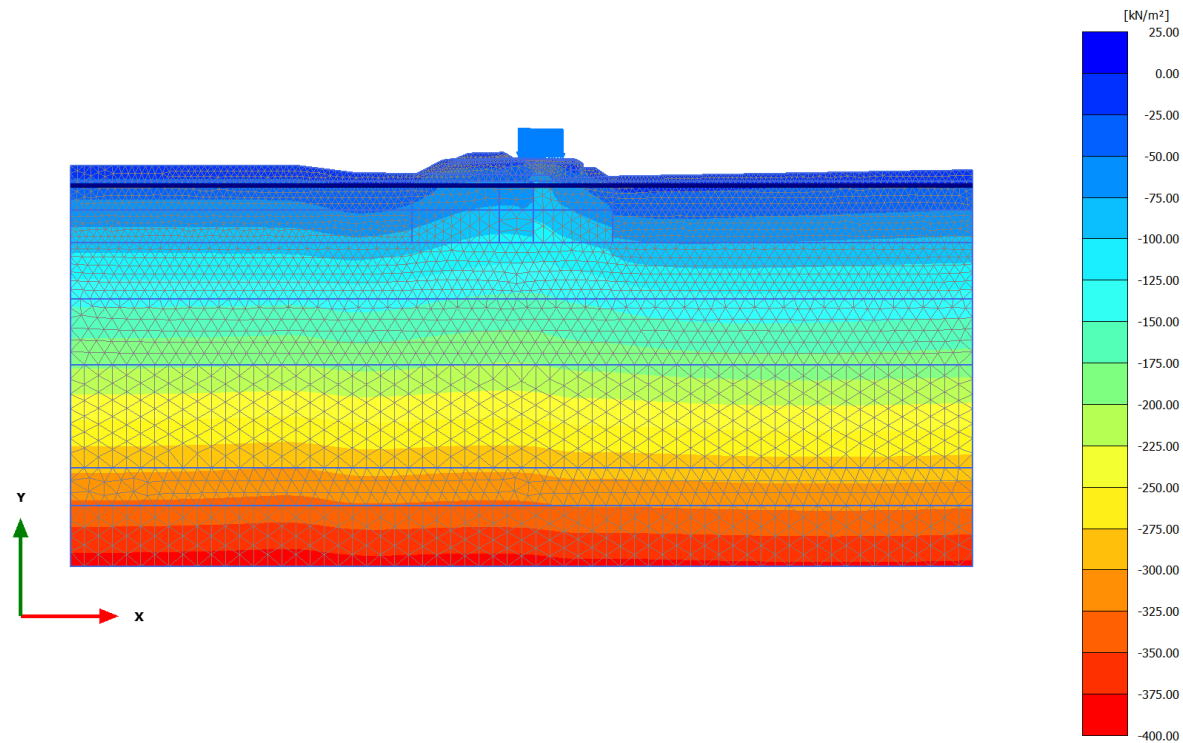


Cartesian effective stress σ'_{xx} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 161.0 kN/m^2 (Element 2 at Node 6350)

Minimum value = -263.5 kN/m^2 (Element 18 at Node 6315)

2.2.3.2.1 Calculation results, armamento dx [Phase_8] (8/54), Cartesian effective stress σ'_{yy}

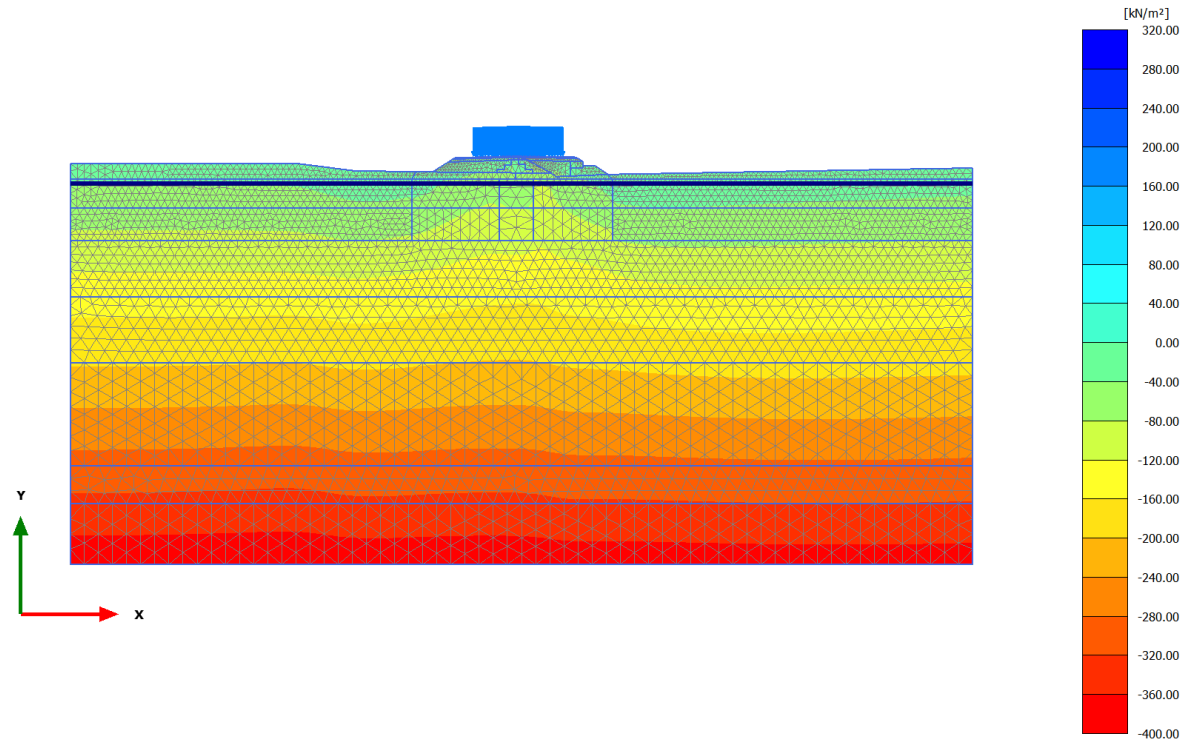


Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $19.34 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 12.27 kN/m^2 (Element 18 at Node 6345)

Minimum value = -391.4 kN/m^2 (Element 7371 at Node 11252)

2.2.3.2.2 Calculation results, armamento sx [Phase_12] (12/87), Cartesian effective stress σ'_{yy}

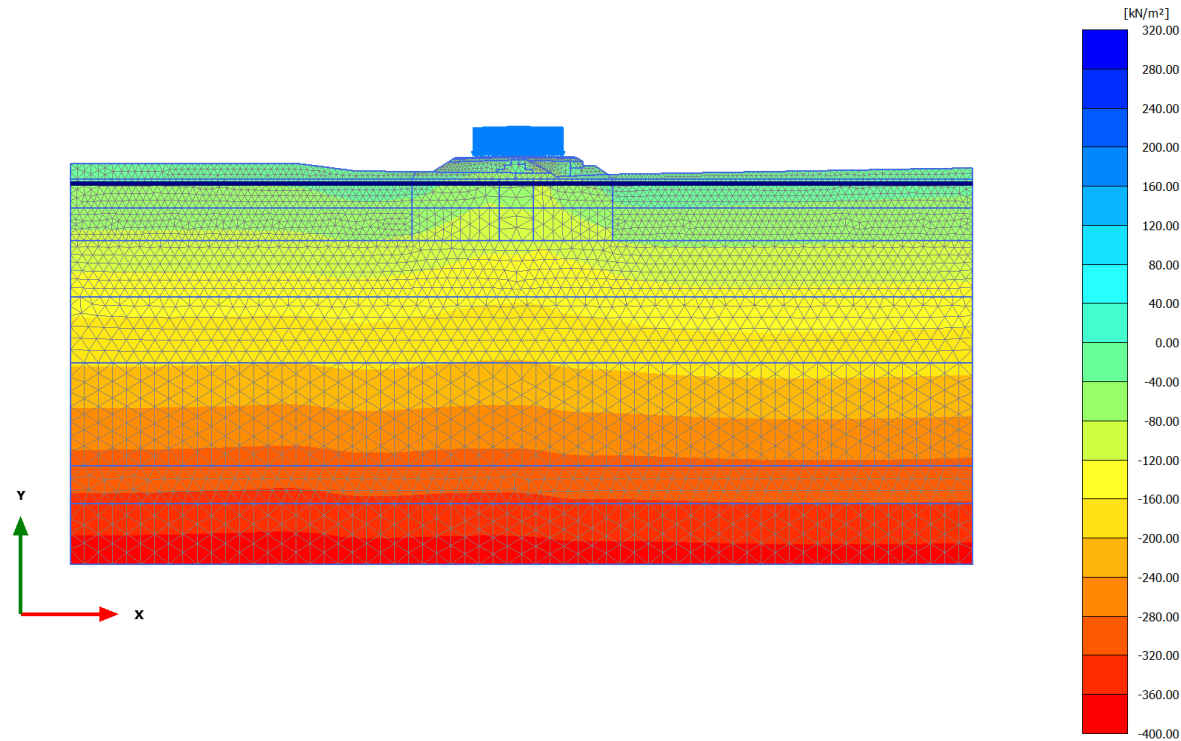


Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $19.67 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 309.5 kN/m² (Element 3 at Node 6397)

Minimum value = -391.2 kN/m² (Element 7371 at Node 11252)

2.2.3.2.3 Calculation results, consolidaz nuovo ril. (1 anno) [Phase_13] (13/96), Cartesian effective stress σ'_{yy}

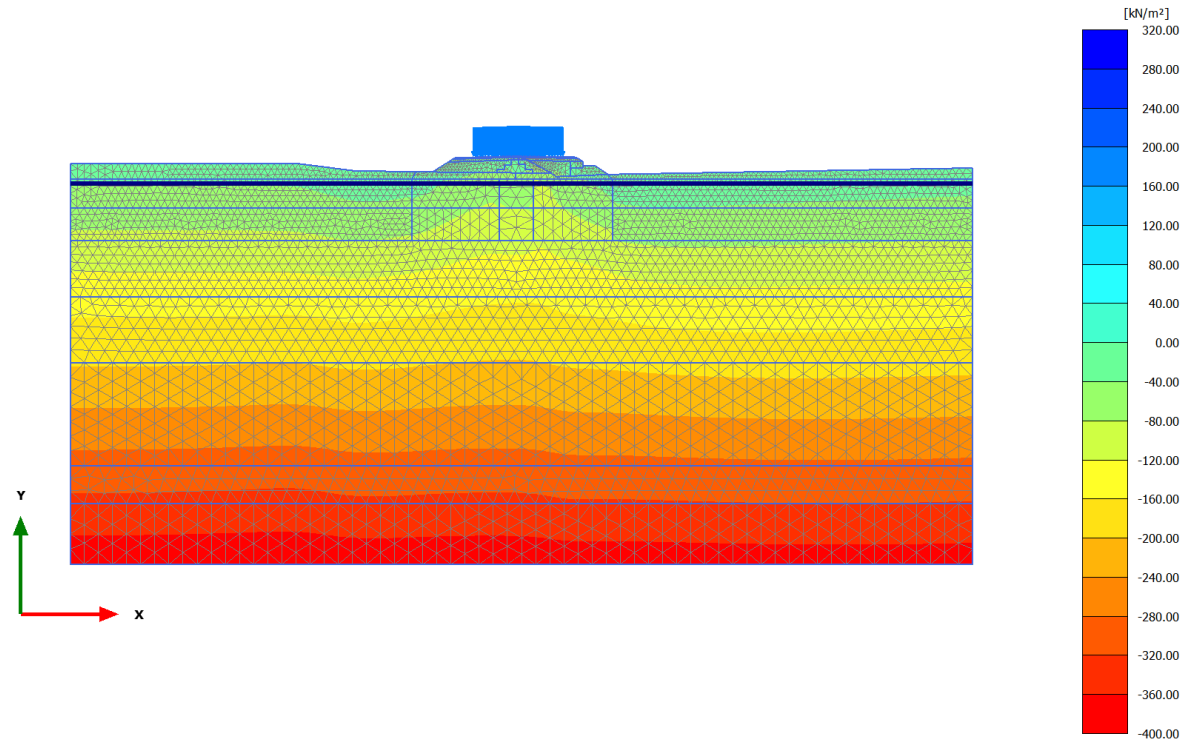


Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $20.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 314.4 kN/m² (Element 3 at Node 6397)

Minimum value = -391.2 kN/m² (Element 7371 at Node 11252)

2.2.3.2.4 Calculation results, consolidaz. nuovo ril. (75 anni) [Phase_18] (18/141), Cartesian effective stress σ'_{yy}



Cartesian effective stress σ'_{yy} (scaled up $5.00 \cdot 10^{-3}$ times) (Time $47.04 \cdot 10^3$ day)

Maximum value = 314.9 kN/m^2 (Element 3 at Node 6397)

Minimum value = -391.2 kN/m^2 (Element 7371 at Node 11252)